

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Johanna Vieri

**ERÄÄN RADIAALIVUOKESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN  
ROOTTORIN DEMAGNETISOITUMINEN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 20.11.2019

Työn valvoja

Professori Timo Vekara

Työn tarkastaja

Dosentti Jere Kolehmainen

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Tero Käsäkangas

## ALKULAUSE

Diplomityö on tehty ABB Motors and Generators, Vaasan yksikön tuotekehitys-osastolle. Diplomityön ohjaajana on toiminut Tero Käsäkangas ABB:lta. Työn tarkastajana on ollut Jere Kolehmainen ja valvojana Timo Vekara Vaasan yliopistolta.

Haluan kiittää kaikkia, jotka ovat kannustaneet ja tukeneet minua diplomityön tekemisessä. Erityinen kiitos kuuluu Motorsin sovellussuunnittelun kollegoille, jotka ovat vuodesta toiseen jaksaneet kannustaa minua opinnoissani.

Vaasassa 20.11.2019

Johanna Vieri

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SISÄLLYSLUETTELO	3
TIIVISTELMÄ	9
ABSTRACT	10
1 JOHDANTO	11
2 KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORI	13
2.1 Sähköinen toimintaperiaate	15
2.2 Kaksiakselimalli	18
2.3 Vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin sijaiskytkennät	19
2.4 Arvokilven leimaukset	21
2.5 Teho ja momentti	22
2.6 Taajuusmuuttajakäyttö	23
2.7 Kestomagneettitahtigeneraattorin sähköiset pääkomponentit	25
2.7.1 Staattori	26
2.7.2 Roottori	28
3 KESTOMAGNEETTIMATERIAALIT JA NIIDEN OMINAISUUDET	32
3.1 Magneettiset materiaalit	35
3.1.1 Ferriitit	36
3.1.2 Alumiini-nikkeli-koboltti-magneetit	36
3.1.3 Samarium-koboltti-magneetit	37
3.1.4 Neo-magneetit	38

3.1.5	Polymeerisidonnaiset kestopagneetit	38
3.2	Kestomagneetin demagnetoituminen	38
4	KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN HÄVIÖT	42
4.1	Yliaaltojen muodostuminen	44
4.2	Hajavuot	45
4.3	Tasavirtahäviöt	48
4.4	Rautahäviöt	50
4.4.1	Hystereesihäviöt	51
4.4.2	Pyörrevirtahäviöt	52
4.5	Mekaaniset häviöt	55
4.6	Lisähäviöt	56
4.7	Yhteenveto häviöistä	57
4.8	Sähkökoneen lämpenemä	59
5	KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN SIMULOINNIT JA MITTAUKSET	63
5.1	Laskentaohjelma	63
5.2	Kestomagneettitahtigeneraattorin simuloinnit	64
5.2.1	Kokonaishäviöt eri taajuuksilla ja tehoilla	66
5.2.2	Tehohäviöiden jakauma eri taajuuksilla	67
5.2.3	Tehohäviöiden jakauma eri tehoilla	68
5.2.4	Kestomagneettien häviötiheyksien simulointi	69
5.3	Kestomagneettitahtigeneraattorin testaaminen	71
6	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	74
	LÄHDELUETTELO	77

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Kreikkalaiset symbolit*

$\alpha$	lämpötilakerroin
$\beta$	lämpötilakerroin
$\delta$	tehokulma
$\gamma$	konduktiivisyys
$\rho$	resistiivisyys
$\psi_m$	magneettivuo
$\psi_F$	napakäämin magneettivuo
$\psi_d$	pitkittäinen magneettivuo
$\psi_q$	poikittainen magneettivuo
$\psi_D$	vaimennuskäämin pitkittäinen magneettivuo
$\psi_Q$	vaimennuskäämin poikittainen magneettivuo
$\psi_{PM}$	kestomagneettien magneettivuo
$\mu$	permealibiliteetti
$\mu_0$	tyhjiön permealibiliteetti
$\mu_r$	suhteellinen permealibiliteetti
$\omega$	kulmataajuus
$\Theta$	lämpenemä
$\tau$	aikavakio

*Muut symbolit*

$B$	magneettivuontiheys
$B_r$	remanenssivuontiheys
$BH_{max}$	energiatulo

$E_{smv}$	päälähdejännite
$f$	taajuus
$H$	magneettikentänvoimakkuus
$H_c$	normaali koersitiivikentänvoimakkuus
$H_{ci}$	luonnollinen koersitiivikentänvoimakkuus
$i_F$	napakäämin virta
$i_d$	pitkittäinen virta
$i_q$	poikittainen virta
$i_D$	vaimennuskäämin pitkittäinen virta
$i_Q$	vaimennuskäämin poikittainen virta
$I$	sähkövirran voimakkuus
$J$	magneettinen polarisaatio
$l$	pituus
$K_k$	käämityskerrroin
$L$	induktanssi
$L_d$	pitkittäinen tahti-induktanssi
$L_q$	poikittainen tahti-induktanssi
$L_{md}$	pitkittäinen magnetointi-induktanssi
$L_{mq}$	poikittainen magnetointi-induktanssi
$L_{D\sigma}$	vaimennuskäämin pitkittäinen hajainduktanssi
$L_{Q\sigma}$	vaimennuskäämin poikittainen hajainduktanssi
$L_{F\sigma}$	napakäämin hajainduktanssi
$L_{S\sigma}$	staattorin hajainduktanssi
$M$	vääntömomentti
$M_m$	magnetointivääntömomentti

$M_r$	reluktanssivääntömomentti
$N$	käämikierrosten lukumäärä
$n$	vaiheiden lukumäärä
$p$	napapariluku
$P$	teho
$P_{\text{add}}$	lisähäviöt
$P_{\text{cu}}$	kuparihäviöt
$P_e$	pyörrevirtahäviöt
$P_{\text{fe}}$	rautahäviöt
$P_{\text{fr}}$	kitkahäviöt
$P_h$	hystereesihäviöt
$R$	resistanssi
$R_S$	staattorin resistanssi
$R_F$	napakäämin resistanssi
$R_d$	pitkittäinen resistanssi
$R_q$	poikittainen resistanssi
$T$	lämpötila
$U_S$	napajännite
$u_d$	pitkittäinen jännite
$u_F$	napakäminen jännite
$u_q$	poikittainen jännite
$V$	tilavuus
$X$	tahtireaktanssi

*Lyhenteet*

ABB	Asea Brown Boveri, monikansallinen yritys
AlNiCo	alumiini-nikkeli-koboltti
BACK EMF	kestomagneettien indusoiva jännite
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
NdFeB	neodyymi-rauta-boori
SmCo	samarium-koboltti

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Johanna Vieri
<b>Diplomityön nimi:</b>	Erään radiaalivuokestomagneettitahtigeneraattorin roottorin demagnetoituminen
<b>Valvoja:</b>	Professori Timo Vekara
<b>Tarkastaja:</b>	Dosentti Jere Kolehmainen
<b>Ohjaaja:</b>	Diplomi-insinööri Tero Käsäkangas
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Oppiaine:</b>	Sähkötekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2000
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2019

**Sivumäärä: 84**

---

**TIIVISTELMÄ**

Radiaalivuotyyppinen kestopagneettitahtikone on kehitetty paperiteollisuuden vaatimuksiin, joissa tarvitaan isoa vääntömomenttia ja hidasta pyörimisnopeutta. Kestomagneettiteknologian kehityksen myötä kestopagneettitahtikoneiden käyttö on laajennut mm. tuulivoimaloihin, joissa pyörimisnopeudet ovat isoja. Kestomagneettitahtikoneen roottorissa sijaitsevat kestopagneetit muodostavat magneettivuon ilman ulkoista magneetointia. Kestomagneettien ansiosta häviöt roottorissa vähenevät huomattavasti verrattuna vierasmagneetoituun tahtikoneeseen. Korkea tehokerroin ja hyötysuhde ovat ominaista kestopagneettitahtikoneelle.

Diplomityön tutkimuskohteena oli nopean kestopagneettitahtigeneraattorin prototyyppi, jonka roottori oli menettänyt magneettisuutensa eli demagnetoisoitunut. Työn tavoitteena oli selvittää tekijät, mitkä aiheuttivat roottorin demagnetisoitumisen. Tutkimuksessa simuloitiin eri teho-taajuus-yhdistelmiä elementtimenetelmällä. Analysoimalla simulointituloksia sekä mitattuja testituloksia yritettiin määrittää empiirisesti sallittua raja-arvoa kestopagneettien häviöille ja häviötiheydelle. Pääpaino tutkimuksessa oli kestopagneettien pyörrevirtahäviöissä, jotka ovat riippuvaisia taajuudesta. Oletuksena oli, että juuri pyörrevirtahäviöt aiheuttivat roottorin demagnetisoitumisen. Kestomagneettitahtigeneraattoriprototyypin testituloksia analysoimalla huomattiin roottorin demagnetisoituminen virran kasvuna sekä tehokertoimen romahtamisena.

Työn tavoitteena oli myös lisätä käytännön ymmärrystä kestopagneettien BH-käyrän tulkintaan. Demagnetisoitumista voidaan ennakoida vertailemalla kestopagneettien vuontiheyksiä eri simulointipisteissä kestopagneettivalmistajan tuottamaan BH-käyrään.

Työn tuloksena vahvistui käsitys, että kestopagneettitahtikoneen suunnittelussa on ymmärrettävä häviöiden, lämpötilan ja taajuuden vaikutus kestopagneettimateriaaliin, jotta välttyttäisiin kestopagneettien demagnetisoitumiselta roottorissa.

---

**AVAINSANAT:** Kestomagneettitahtigeneraattori, kestopagneetti, demagnetoituminen, pyörrevirtahäviöt, BH-käyrä

---

**UNIVERSITY OF VAASA****School of Technology and Innovations**

<b>Author:</b>	Johanna Vieri
<b>Topic of the Thesis:</b>	Rotor demagnetization in a radial-flux permanent magnet synchronous generator
<b>Supervisor:</b>	Professor Timo Vekara
<b>Evaluator:</b>	Docent Jere Kolehmainen
<b>Instructor:</b>	Master of Science Tero Käsäkangas
<b>Degree:</b>	Master of Science in Technology
<b>Major of Subject:</b>	Electrical Engineering
<b>Year of Entering the University:</b>	2000
<b>Year of Completing the Thesis:</b>	2019

---

**Pages: 84****ABSTRACT**

Radial-flux permanent magnet synchronous machine has been developed especially for the demands of paper industry, which requires high torque in a slow rotation speed applications. Permanent magnet materials has been developed rapidly in last decades and use of permanent magnetic technology in different application has expanded for example to high speed wind plants. Rotor of radial-flux permanent magnet synchronous machine has manufactured a permanent magnets. Permanent magnets have a strong magnetic field and sequently power factor and efficiency are higher compared to a externally magnetized machines with a traditional induction rotor.

The purpose of this thesis is to study the phenomenon of rotor demagnetization in a high speed permanent magnet synchronous generator prototype, and investigate the reasons which caused the demagnetization of rotor. Research of prototype was done to simulate a different power-frequency combinations by using calculation program based on element method. By analyzing the simulation results as well as the measured test results, attempt was made to determine the limit value of permanent magnet in a power loss densities and power losses. Especially the amount of eddy current losses were observed in the simulations of prototype. Eddy current losses are frequency dependent and it was assumed the high eddy current losses were the main reason for the rotor demagnetization. Demagnetization of rotor was observed as an increase in current and a power factor collapse during testing.

The topic of thesis was also to increase a practical understanding the BH curve of permanent magnet materials. Demagnetization can be predicted by comparing the flux of permanent magnets at different simulation points to the BH curve produced by the permanent magnet manufacturer.

As a result of this thesis confirmed in the engineering of permanent magnet synchronous generator must be understood the characteristics of magnetic material, influence of temperature and frequency to permanent magnets to avoid a demagnetizing of rotor.

---

**KEYWORDS:** Permanent magnet synchronous generator, permanent magnet, demagnetization, eddy current losses, BH curve.

## 1 JOHDANTO

Kestomagneettitahtikoneesta on tullut varteenotettava kilpailija raskaassa teollisuudessa käytettävälle oikosulkukoneelle. Kestomagneettitahtikone taajuusmuuttajakäytöllä on huomattavasti taloudellisempi vaihtoehto kuin vaihteistokäyttöinen oikosulkukone. Taajuusmuuttaja-kestomagneettitahtikone -yhdistelmällä voidaan säästää ylläpito- ja huoltokustannuksissa, koska sovelluksessa tarvittavien mekaanisten laitteiston määrä vähenee esim. vaihteistoa ei tarvita. Käyttökohteen rajoitettu tilakoko voi toimia valintaperusteena konetyypille. Kestomagneettitahtikoneen runkokoko on pienempi kuin saman tehoisella oikosulkukoneella. Hitausmomentti on riippuvainen runkokoosta; mitä isompi on runkoko sitä isompi on hitausmomentti. Kestomagneettitahtikoneella on hyvä tehokerroin ja hyötysuhde. Vaatimus korkeasta hyötysuhteesta on tullut merkittäväksi tekijäksi kone-suunnittelussa. Korkea hyötysuhde kertoo sähkökoneen energiankäytöstä ja taloudellisuudesta.

Kestomagneettimateriaalien kehittyminen teolliseen käyttöön alkoi 1930-luvulla, jolloin kehitettiin ensimmäiset AlNiCo-tyyppiset kestomagneetit. Materiaalien kehittyttyä kestomagneettien käyttö on monipuolistunut. Kestomagneettiteknologia on nykyään käytössä esim. hisseissä, paperiteollisuudessa, vesivoimalaitoksissa tai tuulivoimaloissa. Kestomagneettiteknologian kehitys on ollut avainasemassa elektroniikkateollisuudessa, joka on vastaavasti vaikuttanut kehitykseen autoteollisuuden elektroniikkaan ja sähköautoihin, joissa hyödynnetään kestomagneettiteknologiaa. Kestomagneetit ovat kehittyneet huomattavasti materiaalien lämpötilan keston ja magneettisten ominaisuuksien suhteen. Suomeen onkin syntynyt teollisuuden tarpeisiin kestomagneettien jalostamiseen perehtyneitä yrityksiä. Kiina hallitsee tällä hetkellä kestomagneettimateriaalimarkkinoita, koska se on ylivoimaisesti suurin harvinaisten maametallien tuottaja. Monopoliasema tuotannossa vaikuttaa materiaalien hintaan ja saatavuuteen. (Nurmi & kump. 2011: 13–21).

Tässä diplomityössä keskitytään radiaalivuotyypiseen kestomagneettitahtigeneraattoriin. Radiaalivuotyypinen kestomagneettitahtigeneraattorin rakenne eroaa perinteisestä vierasmagnetoidusta tahtigeneraattorista roottorin rakenteen osalta, joka on rakennettu nimensä mukaisesti kestomagneeteista. Kestomagneetit itsessään luovat magneettivuon,

jolloin ulkopuolista magnetointia ei tarvita. Tämän seurauksena roottorin kuparihäviöt vähenevät, mikä puolestaan vaikuttaa koneen sähköisiin ominaisuuksiin. Diplomityön teoriaosuudessa esitellään kestopagneettitahtigeneraattorin toimintaa ja rakennetta, sekä perehdytään kestopagneettimateriaaleihin ja demagnetisaatio-ilmioon. Lisäksi tutkitaan sähkökoneen häviöitä. Tutkimusosuudessa perehdytään simulointi- ja testituloksiin.

Diplomityön tarkoituksena on tutkia nopeassa sovelluksessa toimivaa radiaalivuotyypistä kestopagneettitahtigeneraattoria. Asiakas oli tilannut prototyypin tuulivoimageraattorista, joka valmistettiin ABB:lla Motors and Generators -yksikössä Vaasassa. Prototyypinä valmistettiin kestopagneettitahtigeneraattori, jonka toimintapisteeksi määriteltiin 950 kW:n teho ja 150 Hz:n taajuus. Kestopagneettitahtigeneraattoriproto valmistettiin tyyppinä M3BJ 400LB 12.

Ongelmaksi muodostui koestustilanteessa proton lämpenemän jatkuva kasvaminen ja sähköisten ominaisuuksien heikentyminen kuormaa vähennettäessäkin. Tämä viittasi roottorissa olevien kestopagneettien pysyvään demagnetoitumiseen. Demagnetoitumista analysoitiin testien mittaustulosten perusteella sekä simuloimalla elementtimenetelmällä (FEM, Finite Element Method) kestopagneettien magneettivuon tiheyksiä ja häviöitä eri taajuuksilla ja tehoilla.

Työn alkuosassa luvussa 2 esitellään kestopagneettitahtikoneen rakennetta, jossa erityisesti keskitytään sähköisiin pääkomponentteihin, roottoriin ja staattoriin. Luvussa 3 perehdytään kestopagneettimateriaaleihin ja demagnetoitumiseen. Luvussa 4 tarkastellaan kestopagneettitahtigeneraattorin häviöitä, joissa pääpaino on sähköisillä häviöillä. Mekaaniset häviöt sekä muut mekaaniset tekijät rajataan diplomityön ulkopuolelle, vaikka ne ovat myös voineet vaikuttaa kestopagneettien demagnetoitumiseen. Luku 5 sisältää simulointiohjelman esittelyn sekä simulointitulokset. Tutkimuksen johtopäätökset esitetään luvussa 6.

## 2 KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORI

Perinteinen vierasmagnetoitu tahtigeneraattori on monipuolinen sähkökone, sen käyttöalue soveltuu sekä hitaisiin että nopeisiin käyttöihin. Nopeissa sovelluksissa koneen napaluvun voidaan ajatella olevan kahdesta kuuteen. Nopeita sovelluksia ovat esimerkiksi höyry- ja kaasuturbiinit. Hitaassa käytössä napaluku on tyypillisesti kahdeksasta ylöspäin. Hitaita käyttöjä löytyy esimerkiksi vesivoimaloissa ja paperikoneissa.

Tahtikoneet voidaan jaotella roottorin rakenteesta riippuen umpi- tai avonapatahtikoneiksi. Umpinaparoottoria käytetään tyypillisesti silloin, kun kyse nopeista sovelluksista, jossa keskipakovoima voi aiheuttaa mekaanisia rasituksia rakenteille. Avonapaista roottoria käytetään enemmän hitaissa käytöissä, jossa kierrosnopeudet pysyvät alhaisina ja mekaanisia rasituksia ei muodostu samalla tavalla kuin nopeissa käytöissä. Sama jako pätee myös kestromagneettitahtikoneilla. Avonapaisessa rakenteessa poikittaisen ja pitkitäisin induktanssin suhde isompi kuin yksi, vastaavasti umpinapaisella rakenteella suhdeluku on yhtäsuuri kuin yksi. (Pyrhönen 2008: 359). Radiaalivuotyypinen kestromagneettitahtikone on eräs tahtikoneen sovellutus. Kestomagneettitahtikoneet voidaan jakaa mekaanisen rakenteen perusteella radiaali- ja aksiaalivuokoneisiin. Tämä riippuu siitä, että missä asennossa magneettikentän vuo kohtaa akselin. Radiaalivuokoneessa magneettivuo läpäisee roottorin ja staattorin ilmavälin radiaalisesti eli kenttäviivat kohtisuorassa koneen akseliin nähden. Aksiaalivuokoneessa magneettivuo läpäisee roottorin ja staattorin välisen ilmavälin akselin suuntaisesti. (Tuusa 2004: 137–138). Tässä diplomityössä keskitytään vain radiaalivuotyypisiin kestromagneettitahtikoneisiin.

Kestomagneettitahtigeneraattorin ja vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin sähköinen toimintaperiaate on identtinen, mutta käytännön toteutus kuitenkin poikkeaa toisistaan. Kestomagneettigeneraattorin matemaattinen analyysi ja sijaiskytkennät voidaan esittää samalla tavalla kuten vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin. Toisaalta on huomattava, että kestromagneettigeneraattorin osa matemaattisesta yhtälöistä yksinkertaistuu, koska roottorin resistiiviset häviöt puuttuvat. Kestomagneettitahtigeneraattorissa roottorin rakenne

poikkeaa vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin roottorista. Kestomagneettitahtigeneraattorin roottori on toteutettu kestomagneeteilla. Kestomagneettien sijainti roottorissa vaikuttaa sähköisiin ominaisuuksiin sekä matemaattiseen esitykseen.

Roottorin resistiivisten häviöiden puuttuminen kestomagneettitahtikoneella kasvattaa magneettivuontiheyden ilmavälissä, jonka seurauksena vääntömomentti kasvaa. Häviöiden väheneminen vaikuttaa myös sähkökoneen fyysisen mitotukseen ja tarvittavaan materiaalin määrän. Tämän seurauksena hyötysuhde ja tehokerroin kasvavat.

Jäähdytystavalla on merkitystä sähkökoneen kuormitettavuuteen. Tehostetulla tuuletuksella voidaan vaikuttaa ulostulotehon suuruuteen. Esimerkiksi käyttämällä erillistuuletinta voidaan kestomagneettitahtigeneraattoria kuormittaa huomattavasti enemmän kuin itsetuulettavalla rakenteella. Nestekiertoinen jäähdytys on tehokkain jäähdytystapa sähkökoneilla.

Kestomagneettien materiaalivalinnalla vaikutetaan koneen kuormitukseen. Sähkökoneen häviöt ja niiden synnyttämä lämpenemä ovat verrannollisia kuormitukseen. Ison magneettivuon saavuttaminen korkeassa lämpötilassa on kestomagneettimateriaalin haaste. Lämmönkestävyys ja magneettiset ominaisuudet kasvattavat kestomagneettimateriaalin hintaa. Konesuunnittelussa on erityisesti huomioitava kestomagneettien herkkyyys termisille muutoksille tai oikosulkutilanteille, jonka seurauksena käämeissä syntyy korkeita virtapiikkejä, jotka synnyttävät vastamagnetointi-impulsseja magneetteihin. Nämä lisäävät kestomagneettien demagnetoitumisen riskiä. Demagnetoituminen aiheuttaa ei-toivottuja ominaisuuksia sähköisissä toiminta-arvoissa ja koneen toiminnassa, pahimmassa tapauksessa on seurauksena roottorin ja sähkökoneen tuhoutuminen. Kestomagneettien vaurioituminen mekaanisesti voi aiheuttaa myös demagnetoitumista, joten tuotannossa kestomagneettikoneen kokoonpano vaatii myös huolellisuutta.

Sähkökone mitoitetaan asiakkaan vaatimusten perusteella. Asiakas ilmoittaa yleensä jännitteen, taajuuden, käyttötyypin, tehon tai vääntömomentin, joiden perusteella sähkökone mitoitetaan. Sähkökoneen mitoituksessa huomioitavia lisävaatimuksia voivat olla mm.

lämpenemäluokka, ympäristön lämpötila tai ilmanpaine eli missä korkeudessa käyttö sijaitsee merenpinnan tasoon nähden. Muita vaatimuksia ovat käynnistysvirtarajoitukset, käynnistysaika tai -momentti, hyötysuhdeluokka tai tehokerroin. Sähkökonesuunnittelussa on erityisesti hyötysuhteen merkitys kasvanut, kansallisten standardien lisääntyessä ja vaatimusten tiukentuessa. Korkea hyötysuhde onkin eräs tärkeä kilpailutekijä sähkökoneiden valmistuksessa. Taajuusmuuttajakäyttö asettaa lisävaatimuksia sähkökoneen mekaaniseen ja sähköiseen rakenteeseen, kuten esimerkiksi eristetyn laakerin sekä vahvennetun eristyksen käämissä käyttö on suositeltavaa, riippuen runkokoosta ja jännitteestä.

## 2.1 Sähköinen toimintaperiaate

Radiaalivuotyypin kestopagneettitahtigeneraattorin toimintaperiaatteena on roottorin ja staattorin magneettikentän pyöriminen samassa tahdissa. Tämän fysikaalisen ilmiön vuoksi kestopagneettitahtikonetta kutsutaan myös monivaiheiseksi kiertokenttäkoneeksi. Symmetrinen kolmivaiheinen kuormitusvirta synnyttää staattorissa sijaitsevassa symmetrisessä kolmivaihekäämityksessä magneettikentän, ns. ankkurikentän. Vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin roottorissa, josta käytetään myös nimitystä napapyörä sijaitsee magnetointikäämitys. Syötettäessä tasavirtaa magnetointikäämitykseen muodostuu roottoriin magneettikenttä ns. pääkenttä. Kestopagneettitahtigeneraattorissa roottorin magnetointikäämi on korvattu kestopagneeteilla, joten erillistä tasavirtalähdettä ei tarvita magneettikentän muodostamiseen. Tavoitteena on muodostaa ilmavälissä mahdollisimman sinimuotoinen magneettivuontiheys. Sinimuotoisuus toteutetaan sopivalla staattorikäämityksen ja kestopagneettien muotoilulla. (Aura, Tonteri 1996: 215–218).

Tahtikoneen pyörimisnopeus  $n$  määritellään yhtälön mukaisesti (Aura, Tonteri 1996: 215)

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \frac{r}{\text{min}}, \quad (1)$$

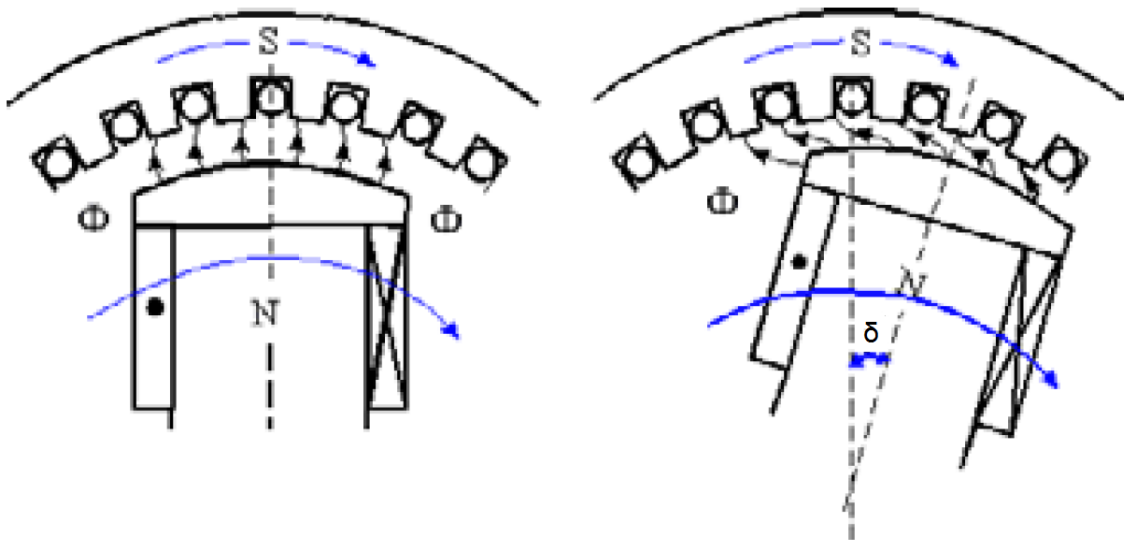
missä  $f$  on taajuus hertseinä ja  $p$  on napapariluku.

Tahtikoneen koneen toimiessa generaattorina, työkonne pyörittää roottoria, jonka seurauksena staattorikäämejä lävistävä magneettivuo muuttuu. Tämän seurauksena käämeihin indusoituu sinimuotoinen jännite  $E_{smv}$ , joka kutsutaan myös päälähdejännitteeksi (Aura, Tonteri 1996: 216)

$$E_{smv} = 4,44k_k f N \Psi_m, \quad (2)$$

missä  $k_k$  on käämityskerroin,  $f$  taajuus,  $N$  staattorin vaihekäämin kierrosten lukumäärä ja  $\Psi_m$  yhden magneettinavan päävuo.

Tahtikoneen käydessä tyhjäkäynnissä staattori on kuormittamaton. Kestomagneetti-generaattorin toimiessa tyhjäkäynnillä lähdejännite on yhtä suuri kuin kestopagneettien indusoima jännite. Kuormitetussa kestopagneettitahtikonessa kiertää kaksi magneettikentää. Kestomagneettien muodostama pääkenttä, sekä ankkurikenttä, jonka staattorin kuormitusvirta muodostaa. Staattorin kuormitusvirran vaikutusta kutsutaan myös ankkurireaktioksi. Nämä magneettikentät summautuvat ja muodostavat ns. resultoivan magneettikentän, joka pyörii samalla nopeudella. Kuvassa 1 on esitetty periaatteellinen kuva kuormittamattomasta ja kuormitetusta perinteisestä tahtikoneesta.



**Kuva 1.** Periaatekuva tyhjäkäynnissä olevasta ja kuormitetusta vierasmagnetoidusta tahtigeneraattorista. (Korpinen 2018: 15).

Generaattorin ollessa kuormittamaton eli tyhjäkäynnissä ovat N- ja S-napa eli pää- ja ankkurikentät ovat kohdakkain. Kuormitustilanteessa ankkurikenttä seuraa pääkenttää tiettyssä kulmassa ts. ankkurikenttä pyrkii jarruttamaan sähköisellä vääntömomentilla pääkentän etenemistä. Mitä enemmän generaattoria kuormitetaan sitä enemmän tehokulma  $\delta$  kasvaa. Tahtikoneen tehokulma-yhtälö on

$$P = \frac{E_{smv} - U_s}{X} \sin \delta, \quad (3)$$

missä  $U_s$  on napajännite ja  $X$  on kokonaistahtireaktanssi, joka muodostuu johdinten vaihereaktanssista, moottorin sekä generaattorin tahtireaktanssista. (Korpinen 2000: 128).

Maksimivääntömomentti saavutetaan avonapaisella tahtikoneella tehokulman ollessa vähemmän kuin 90 astetta. Umpinapaisen koneen maksimi vääntömomentti saavutetaan tehokulman ollessa 90 astetta. (Pyrhönen 2006: 7.63). Yleisesti voidaan todeta, tehokulman ollessa isompi kuin 90 astetta magneettinapojen yhteys katkeaa ja generaattori putoaa tahdistista aiheuttaen teho- ja jänniteheilahteluja sähköverkossa.

Vierasmagnetoitua tahtigeneraattoria voidaan ajaa jäykässä verkossa yli- ja alimagnetoituna. Magnetoinnin säädöllä vaikutetaan loistehon muodostumiseen sähköverkossa. Ylimagnetoitu tahtigeneraattori tuottaa sähköverkkoon induktiivista loistehoa, jonka seurauksena napapyörän magnetoituminen vähenee. Alimagnetoituna tahtigeneraattori kuluttaa induktiivisen magnetointitehon sähköverkosta, jonka seurauksena napapyörän magnetointi vahvistuu. (Aura 1996: 220–222). Yleensä tahtikoneet kytketään verkkoon ylimagnetoituneina, jolloin tehokerroin on 0,7–0,8. (Pyrhönen 2005: 7–58). Kestomagneettitahtigeneraattorissa ei ole mahdollista säätää magnetointia kuin vierasmagneetoidussa tahtikoneessa. Magnetoinnin säätö tapahtuu staattorijännitettä säätämällä kestopagneettigeneraattorissa. (Tuusa 2001: 142).

## 2.2 Kaksiakselimalli

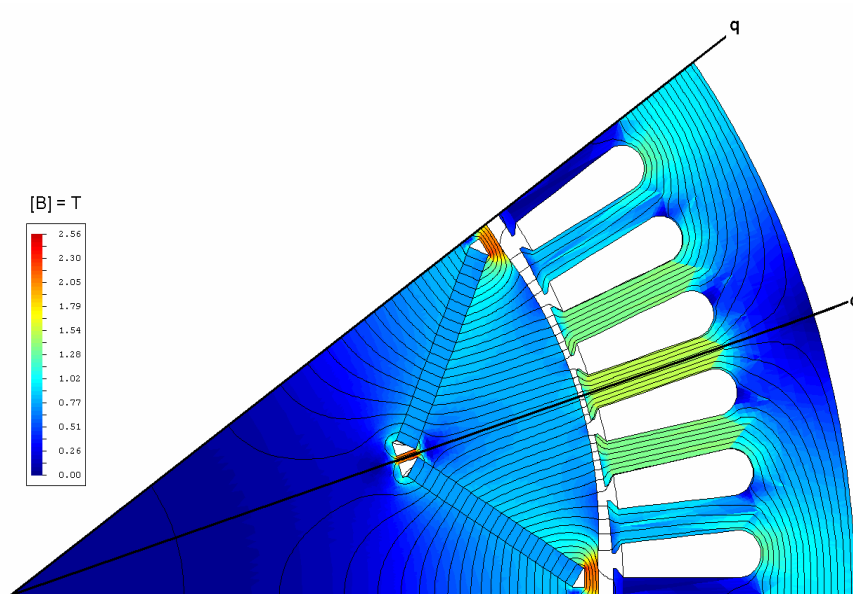
Tahtikoneen muutostilaa tutkitaan käyttämällä avaruusvektoreiden kaksiakselimallia. Se on avaruusvektoriteorian sovellutus, jossa staattorin kolmivaiheinen käämitys korvataan kaksivaiheisella pyörivällä käämityksellä. Kaksiakselimallissa magneettinen epäsymmetrisyys eli ilmavälin leveyden vaihtelut sekä induktanssien riippuvuudet roottorin asentokulmasta voidaan jättää huomioimatta. Sähkökoneen tyypistä riippuu minkälainen koordinaatisto sopii parhaiten matemaattiseen esitykseen. Kestomagneettitahtigeneraattorin analysoinnissa on luontevinta käyttää roottoriin sidottua dq-koordinaatistoa. Dq-koordinaatistossa jänniteyhtälöt on jaettu pitkittäiseen (direct) eli d-akselin ja poikittaiseen (quadrature) q-akselin suuntaisiin komponentteihin.

Tahtikoneen sähköiset ominaisuudet määritellään joko induktanssien  $L$  tai reaktanssien  $X$  avulla. Mikäli tahtikonetta kuormitetaan vakiotaaajuudella esim. sähkölaitoksissa tällöin yhtälöratkaisuihin voidaan käyttää apuna reaktansseja. Induktanssin ja reaktanssin riippuvuus toisistaan voidaan esittää seuraavasti

$$X = \omega L = 2\pi fL, \quad (4)$$

missä  $\omega$  on kulmataajuus. (Pyrhönen 2012: 361).

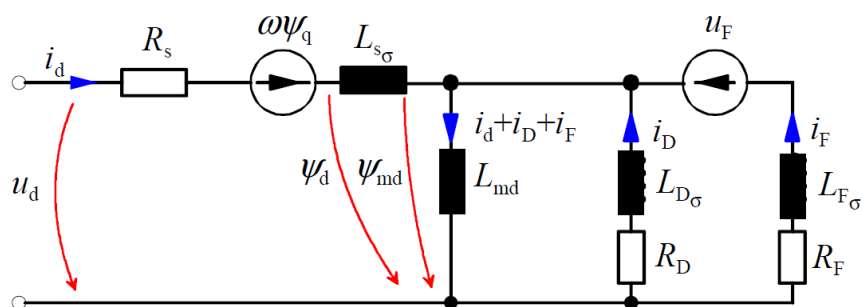
Kuvassa 2 havainnollistetaan dq-akselin sijaintia eräässä kestopagneettitahtikoneessa. D-akseli on kestopagneettien magneettivuon suuntainen, kun taas q-akseli on kohtisuorassa magneettivuohon nähden. Väritys ja mustat vuoviivat kertovat magneettikentän tiheyden (Talvitie 2005: 33).



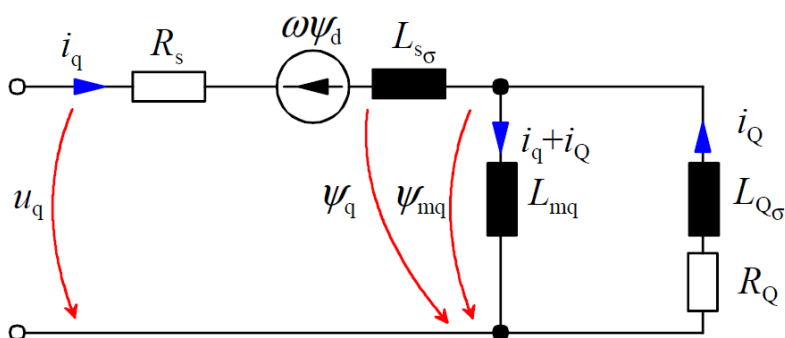
**Kuva 2.** Dq-koordinaatisto eräässä kestopagneetikoneessa. (Talvitie 2005: 33).

### 2.3 Vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin sijaiskytkennät

Vierasmagnetoidun tahtigeneraattorin sijaiskytkennät esitetään avaruusvektorien avulla. Generaattorin pitkittäinen- ja poikittainensuunta käsitellään erikseen sijaiskytkennöissä kuvien 3 ja 4 mukaisesti. Sijaiskytkennät esitetään induktanssien avulla.



**Kuva 3.** Vierasmagnetoidun tahtikoneen pitkittäissuuntainen sijaiskytkentä (Pyrhönen 2005: 7.52)



**Kuva 4.** Vierasmagnetoidun tahtikoneen poikittaissuuntainen sijaiskytkentä (Pyrhönen 2005: 7.52).

Sijaiskytkennässä arvot  $u_d$  ja  $u_q$  ovat pitkittäinen- ja poikittainenstaattorijännite,  $u_F$  on napakäämin jännite. Vastaavasti staattorivirrälle löytyy pitkittäis- ja poikittaissuuntaiset komponentit  $i_d$  ja  $i_q$ . Vaimennuskäämin pitkittäis- ja poikittaissuuntainen virta on merkitty  $i_D$  ja  $i_Q$ . Staattorin resistanssi on  $R_s$  ja  $R_F$  on napakäämin resistanssi ja  $i_F$  on napakäämivirta.  $R_D$  on pitkittäisen ja  $R_Q$  poikittaisen vaimennuskäämin resistanssi. Staattorin käämivuot voidaan jaotella  $\psi_d$  pitkittäissuuntaiseen ja  $\psi_q$  poikittaissuuntaiseen komponentteihin.  $\psi_F$  on napakäämivuo. Vaimennuskäämin vuot voidaan vastaavasti ilmoittaa pitkittäisenä  $\psi_D$  - ja poikittaisena  $\psi_Q$  -komponenttina. (Pyrhönen 2005: 7.52).

$L_d$  ja  $L_q$  ovat pitkittäis- ja poikittaistahti-induktanssi. Vastaavasti löytyy myös pitkittäisen- ja poikittainen magnetointi-induktanssi  $L_{md}$  ja  $L_{mq}$ . Hajainduktanssia  $L_{s\sigma}$  esiintyy sekä pitkittäis- että poikittaiskomponentilla.  $L_{F\sigma}$  on napakäämin hajainduktanssi.  $L_{D\sigma}$  ja  $L_{Q\sigma}$  ovat vaimennuskäämin pitkittäinen ja poikittainen hajainduktanssi.

Induktanssien yhtälöt ovat

$$L_d = L_{md} + L_{s\sigma} \quad (5)$$

$$L_q = L_{mq} + L_{s\sigma} \quad (6)$$

$$L_D = L_{md} + L_{D\sigma} \quad (7)$$

$$L_Q = L_{mq} + L_{Q\sigma} \quad (8)$$

Mikäli koneesta puuttuu vaimennuskäämi  $L_{md}$  niin käämivoiden matemaattinen yksinkertaistuu tämän seurauksena. (Pyrhönen 2005: 9.6).

## 2.4 Arvokilven leimaukset

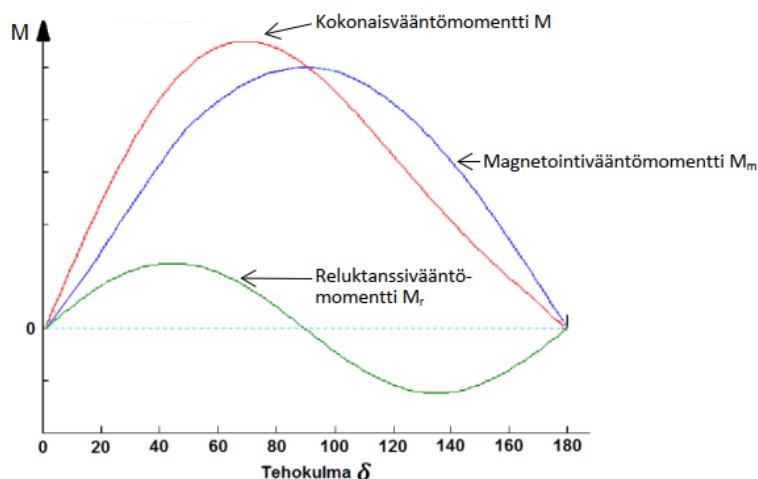
IEC 60034-1:2017 -standardi määrittelee arvokilven sisällön. Kestomagneetikoneen arvokilven pakollinen tieto leimausarvojen lisäksi on kestopagneettien indusoiman jännitteiden arvo, BACK EMF. ABB Motors and Generators, Vaasa leimaa arvokilvelle myös sijaiskytkennän mukaisen resistanssin, poikittais- ja pitkittäisinduktanssin kuvan 5 mukaisesti. Nämä arvot toimivat taajuusmuuttajan asetteluarvoina. Arvot ovat käämikohtaisia.

ABB Oy, Motors and Generators Vaasa, Finland						
CE						
3 ~ PERMANENT MAGNET MACHINE						
M3BJ 400LC 12 IMB3/IM1001						
1394.4Z6-1			2017		No. 3G1F1743466490	
			Ins.cl. F		IP 55	
V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty
370 D	60	4.70	600	7.71	0.98	S1IC411
370 Y	34.6	2.56	34.6	4.19	0.99	S1IC411
640 D	103.5	5.00	1035	4.75	0.98	S1IC411
Prod. code 3GBJ406535-ADG107418450						
R 2.24 mDhm, Ld 0.35 mH, Lq 0.45 mH DELTA						
BACK EMF 380 V 600 RPM DELTA						
SPEC.INSUL.						
INSULATED N-BEARING				Nmax 1.2x nom. speed		
6324/C3				6319/C3VL0241		3280 kg
				ABB		IEC 60034-1

**Kuva 5.** Arvokilpikuva kestopagneettitahtikoneesta joka on valmistettu ABB Motors and Generators Vaasan yksikössä.

## 2.5 Teho ja momentti

Vääntömomentti syntyy ilmavälissä staattorivirran ja -vuon vaikutuksesta ja on riippuvainen tehokulman suuruudesta. Kokonaisvääntömomentti  $M$  muodostuu magnetoitinvääntömomentistä  $M_m$  ja reluktanssivääntömomentistä  $M_r$  kuten kuva 6 osoittaa.



**Kuva 6.** Vääntömomentit tehokulman funktiona (Vesala 2011: 25).

Vierasmagnetoidun tahtikoneen vääntömomentin muodostuminen pitkittäisen ja poikittaisen staattorivirran  $i_d$  ja  $i_q$  sekä -induktanssien yhteisvaikutuksesta esitetään

$$M = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + L_{md} i_F i_q + L_{md} i_D i_q - L_{mq} i_Q i_d]. \quad (9)$$

Reluktanssivääntömomentti on seurausta induktanssien muutoksesta  $(L_d - L_q) i_d i_q$ , jota esiintyy vain avonapaisilla koneilla, vaimennuskäämivirtojen synnyttämä vääntömomentti huomioidaan vain muutostilanteisessa. Voidaankin todeta, että vääntömomentti syntyy napakäämivirrasta ja poikittaisesta staattorivirtakomponentista. (Pyrhönen 2005: 7.35).

Yleinen tehon  $P$  yhtälö avonapaiselle kestopagneettiähtikoneelle induktanssien avulla on

$$P = 3 \frac{E_{PM} U_s}{\omega L_d} \sin \delta + 3 U_s^2 \frac{L_d - L_q}{2 \omega L_d L_q} \sin 2 \delta. \quad (10)$$

Umpinapaisella koneella tehokulmayhtälö yksinkertaistuu jälkimmäisen termin jäädessä pois, koska pitkittäis- ja poikittaisinduktanssi ovat suunnilleen yhtä suuria, joten saadaan

$$P = \frac{E_{PM} U_s}{\omega L_d} \sin \delta, \quad (11)$$

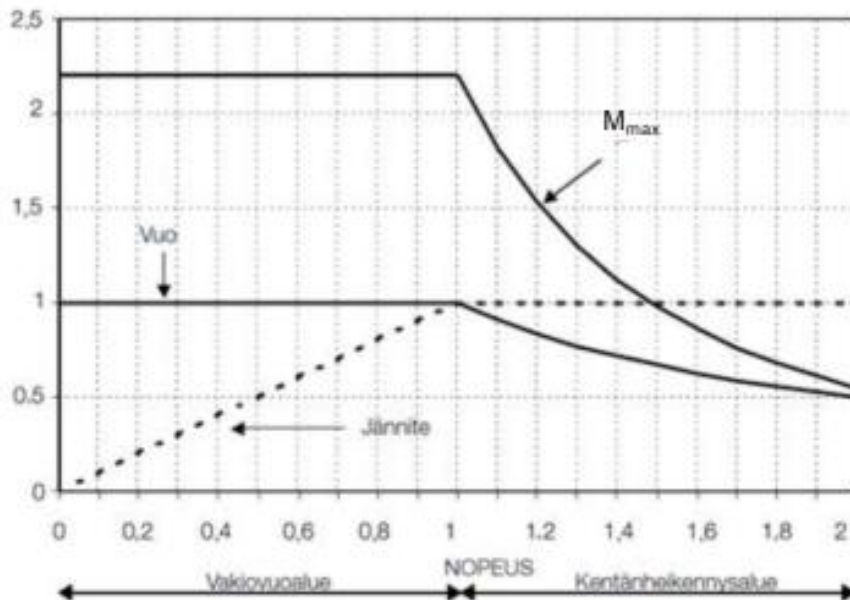
missä  $E_{PM}$  on kestopagneettien indusoima jännite. (Pyrhönen & kump. 2012: 395).

Kestomagneettitahtikoneessa esiintyy myös värähtelevää vääntömomenttia, joka ei ole koneen toiminnan kannalta haluttu ominaisuus. Värähtelevä momentti aiheuttaa sähkökoneessa ääniä ja tärinää etenkin hitailla nopeuksilla. Värähtelevää momenttia on kahdentyyppistä; hammasvääntömomenttia (engl. cogging torque) ja pulsaatiomomenttia (engl. ripple torque). Pulsaatiomomentti syntyy ilmvälissä ei-sinimuotoisen magneettivuon seurauksena. Hammasvääntömomentti ei riipu kuormavirrasta vaan on seurausta staattorihampaiden ja roottorissa olevien kestopagneettien keskinäisestä vaikutuksesta. Hammasvääntömomenttia esiintyy erityisesti umpinapaisilla kestopagneettitahtikoneilla. Hammasvääntömomenttia voidaan useilla keinoilla vähentää kuten kestopagneettien sekä staattorin urien lisäämisellä, niiden geometrian muotoilulla sekä ilmvälän pidentämisellä. Tämä vaikuttaa negatiivisesti muihin sähköisiin ominaisuuksiin. (Lateb, Takorabet 2006: 442; Heikkilä 2002: 52 ).

## 2.6 Taajuusmuuttajakäyttö

Kestomagneettitahtigeneraattoria ohjataan taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajan aiheuttamat yliaallot ja niiden synnyttämät häviöt lisäävät haastetta konesuunnitteluun sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien osalta. Taajuusmuuttajakäyttö tulee huomioida käänin ja laakereiden eristyksessä. Lisäksi suurilla pyörimisnopeuksilla on huomioitava laakereiden sallittu pyörimisnopeus. Vierasmagnetoidun tahtikoneen pyörimisnopeuden

kasvaessa jännite nousee kentänheikennyspisteeseen saakka, jonka jälkeen se pysyy vakiona kuvan 7 mukaisesti.



**Kuva 7.** Nopeuden vaikutus vakio- ja kentänheikennysalueella (ABB tekninen opas nro 7 2013: 11).

Jännitteen, maksimimomentin, ja magneettivuon käyttäytyminen määräytyy nopeusalueittain. Nopeusalueet jaetaan vakio- ja kentänheikennysalueeseen nimellispyörimispisteen perusteella. Vakiovualueessa momentti säilyy vakiona jännitteen ollessa verrannollinen pyörimisnopeuteen. Nimellispisteen yläpuolella on kentänheikennysalue, jossa jännite ei enää kasva nopeuden funktiona, minkä seurauksena staattorin magneettikenttä heikentyy. Pyörimisnopeuden kasvattaminen kentänheikennysalueella ei kasvata vääntömomenttia, mutta vakiotehon säilyttäminen on mahdollista. Maksimivääntömomentti  $M_{max}$  on kääntäen verrannollinen nopeuteen kentänheikennysalueella, kun taas vakiovualueella maksimivääntömomentti kasvaa lineaarisesti verrattuna nopeuteen. Kentänheikennysalueella korostuvat sähkömagneettiset tekijät tietyillä konetyypeillä sekä lämpenemän kasvaminen vääntömomentin rajoituksen vuoksi. Lisäksi sähkökoneen mekaaniset

rajoitukset voivat estää toiminnan kentänheikkennysalueella. (Niiranen 1998: 24). Kuvassa 7 nähdään miten maksimimomentti, jännite ja magneettivuo käyttäytyvät eri nopeusalueilla.

Kestomagneettitahtigeneraattorilla indusoitunut jännite kasvaa lineaarisesti nopeuden funktiona, vaikka ajopiste olisikin kentänheikkennysalueella. Tämä johtuu kulmanopeuden kasvusta, jonka seurauksena staattoria lävistävän vuontiheyden  $\mathbf{B}$  arvo kasvaa. Faradayn induktiolakia soveltamalla voidaan määrittää indusoituva jännite

$$E = \frac{d}{dt} \int \mathbf{B} ds = \omega \int \mathbf{B} ds. \quad (12)$$

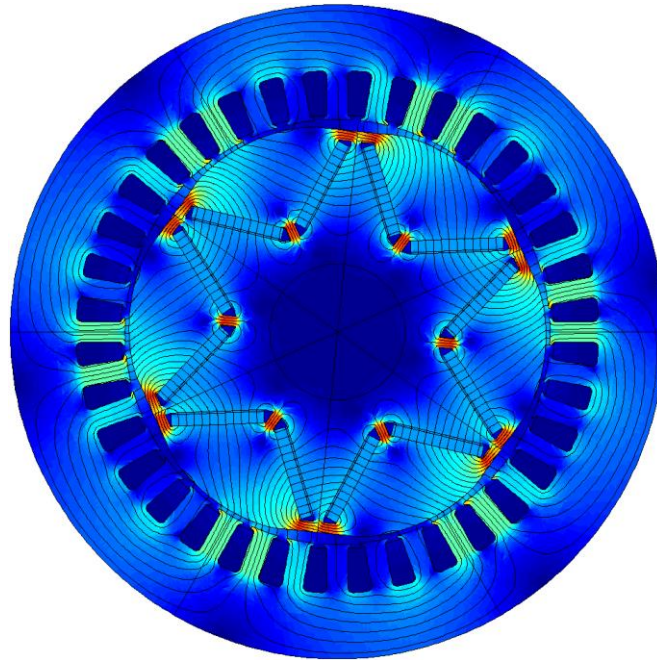
Korkeilla taajuuksilla ajettavan kestopagneettitahtigeneraattorin taajuusmuuttajakäytössä on huomioitava myös taajuusmuuttajan jännitekestoisuus, koska kestopagneettien indusoiva jännite on riippuvainen taajuudesta.

## 2.7 Kestomagneettitahtigeneraattorin sähköiset pääkomponentit

Tahtikoneen sähköiset pääkomponentit ovat staattori ja roottori. Pääkomponenttien materiaalivalinnalla ja mekaanisilla muotoilulla vaikutetaan häviöiden ja lämpenemän muodostumiseen, jotka puolestaan vaikuttavat koneen suoritusarvoihin. Tahtikoneen suoritusarvoja muokataan sähkölevyn, roottorin kestopagneettien ja staattorikäämityksen materiaalin ja geometrian avulla.

Staattori ja roottori rakentuvat dynamo- eli sähkölevystä. Levymateriaalina käytetään pääasiallisesti terästä, johon sekoitetaan pieniä määriä muita metalleja, kuten kupari, pii, magnaani, fosfori ja alumiini. Sekoitussuhde riippuu halutuista ominaisuuksista. Sähkölevyt ovat laminoituja, eli levyjen välissä on eristeet. Sähkölevyssä on uria, jotka ovat konetyypistä riippuen on täytetty alumiinilla, johtimilla, kestopagneeteilla tai tyhjiöllä. Mitä enemmän koneessa on uria sitä sinimuotoisemmin on jakaantunut magnetomotorinen voima (mmv). Iso uraluku lisää sähkökoneen hintaa ja käämityksen kompleksisuutta

(Talvitie 2005: 14). Kuvassa 8 on FCSmek-laskentaohjelman visuaalinen esitys kesto-  
magneettitahtigeneraattorin roottorista ja staattorista.



**Kuva 8.** Kestomagneettikoneen pääkomponentit (Kolehmainen 2012).

### 2.7.1 Staattori

Staattorikäimityksellä tarkoitetaan urissa kulkevia käämivyyhtiä. Käämitys muodostuu kolmesta samanlaisesta vyyhdistä, jotka sijoitetaan staattoriuraan 120 asteen toisistaan. Käämivyyhti muodostuu kuparisista johtimista, joiden pinnalla on lakattu eristekerros. Johtimista käytetään myös termiä emalilanka. Johtimien määrällä, halkaisijalla sekä rinnakkaisten haarojen määrällä vaikuttaa sähköisiin suoritusarvoihin. Käämivyyhtien eristämällä lisätään mekaanista kestävyyttä ja suojataan johtimia jännitepiikeiltä tai vuotovirroilta. Eristys on apuna myös lämmönsiirrossa. Mitä enemmän häviöitä kone tuottaa ja mitä korkeampi on ympäristön lämpötila, sitä parempi johtimien eristyksen tulee olla.

Kolmevaihekäimityksessä on useita käämistapoja, kuten kokovako- ja murtovakokäämitys. Molemmat käämistavat voidaan toteuttaa yksi- tai kaksikerroksisena ja niitä

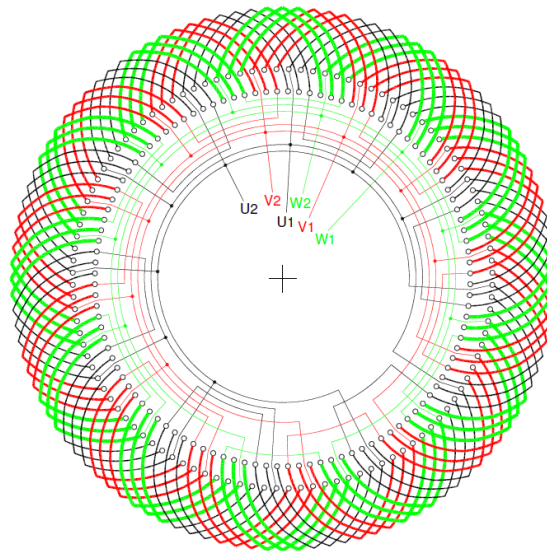
voidaan jänteistää. Jänteistyksellä pystytään vaikuttamaan häviöiden muodostumiseen sekä urassa kulkeviin johdinten määrään. Vakoluku  $q$  kertoo, minkälainen käämitys koneessa on

$$q = \frac{Q}{2pm}, \quad (13)$$

missä  $Q$  on staattorin uraluku,  $p$  on napaparien määrä ja  $m$  vaiheluku.

Kokovakokäämityksellä vakoluku on kokonaisluku. Vastaavasti murtovakokäämityksellä vakoluku on murtoluku. (Aura 1996: 135–137). Murtovakokäämityksellä saadaan lisää joustavuutta uraluvun valintaan ja halutun magneettivuontiheyden saavuttamiseen. Jänteistämistä hyödytään erityisesti murtovakokäämityksellä. Toisaalta murtovakokäämityksen ongelmana on aliharmoniset aallot. (Pyrhönen 2005: 2.25).

Diplomityössä tutkittavalla kestmagneettitahtigeneraattorilla oli kokovakokäämitty kaksokerroslimikäämi kuvan 9 mukaisesti. Tällaisessa käämityksessä on kaksi vyyhden sivua samassa urassa, jolloin vyyhdeillä on yhtäsuuri leveys ja vyyhtien lukumäärä on sama kuin uraluku. (Aura 1996: 136).



**Kuva 9.** Jänteistämätön kaksikerroslimikäämitys.

Vierasmagnetoidun tahtikoneen roottorissa voi napakäämityksen lisäksi olla vaimennuskäämitys. Se vastaa oikosulkumoottorin häkkikäämityksen kaltaista oikosuljettua urakäämitystä. Vaimennuskäämiä käytetään napakäämityksen virranaaltoisuutta ja oikosulkuinduktasseja epästabailissa verkossa käynnistyksen tai kuormituksen muutosten yhteydessä (Niiranen 1999: 33). Kestomagneettitahtigeneraattorin säätö hoidetaan yleensä taajuusmuuttajan kautta, jolloin vaimennuskäämin käyttö on tarpeetonta.

### 2.7.2 Roottori

Roottorin rakenne määrittää, onko kyseessä avo- vai umpinapainen konetyyppi ja miten sen matemaattiset yhtälöt muodostuvat. Kestomagneettitahtigeneraattorilla on avonapaisen koneen ominaisuudet, mikäli kestomagneetit sijaitsevat roottorin sisällä upotettuina. Umpinapaisessa koneessa kestomagneetit sijaitsevat roottorin pinnalla. Roottorirakenteiden eroavaisuudet näkyvät sähköisissä arvoissa kuten pitkittäis- ja poikittaisinduktansseissa sekä ilmavälin pituudessa. (Pyrhönen 2005: 7.49).

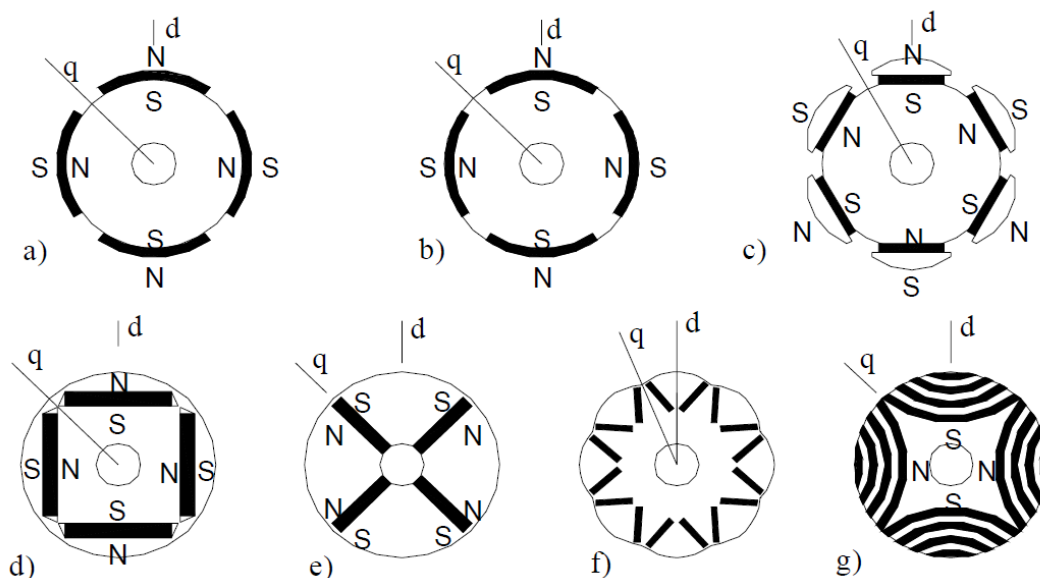
Kestomagneetit synnyttävät magneettivuon kestomagneettitahtikoneessa ilman erillisiä käämityksiä tai apujännitteitä. Roottorin pyöriessä aina indusoituu jännitteitä, joten tämä on huomioitava käyttöturvallisuudessa. Kestomagneetit voivat sijaita upotettuna roottorin sisällä tai pinnassa. Lisäksi ne voidaan liimata roottoriin pintaan. Kestomagneetit sijaitsevat tangentialisesti tai radiaaliseksi, symmetrisesti tai epäsymmetrisesti. Magnetointi voi tapahtua joko säteen tai kehän suuntaisesti. (Gieras & Wing 2002: 195).

Pintamagneettien etuna voidaan pitää helppoa asennusta ja muotoilun helpoutta, mikä yksinkertaistaa rakennetta ja vähentää materiaalin määrää. Pintamagneeteilla ilmavälin vuontiheys on pienempi kuin remanenssivuontiheys ja ankkurireaktio on vähäisempi. Pintaan asennetut kestomagneetit ovat kuitenkin altiimpia staattorin magneettikentän vaikutukselle sekä pyörrevirtojen aiheuttamalle lämpenemiselle, jonka seurauksena kestomagneetit voivat helposti demagnetoitua. Pinnassa olevien kestomagneettien uudelleenmagnetointi on huomattavasti helpompaa kuin upotettujen magneettien. Pintamagneettikoneessa pitkittäis- ja poikittaisinduktanssit ovat yhtä pieniä ja ilmaväli on suuri. Suurien pyörimisnopeuksien vuoksi keskipakovoimat voivat aiheuttaa haasteita pintamagneettien

kiinnitykseen sekä lisäksi vaimennuskäämityksen käyttö on kallista. Roottorin rakenne on kuitenkin yksinkertaisempi pintamagneettikoneissa ja täten sen valmistaminen tulee kokonaiskustannuksiltaan edullisemmaksi kuin uppomagneettikoneen. (Gieras & Wing 2002: 195).

Roottoriin upotetuissa kestopagneeteissa on vähemmän pyörrevirtahäviöitä. Lisäksi ne ovat paremmin suojassa demagnetoitumiselta ja ankkurikentältä. Roottorin valmistaminen on haastavampaa ja kalliimpaa roottoriin upotetuilla kestopagneeteilla. Niiden uudelleenmagnetointi on haasteellista sijaintinsa vuoksi. Ilmavälin vuontiheys on suurempi kuin remanessivuontiheys uppokestopagneeteilla napaluvun ollessa suurempi kuin neljä. Tämä tarkoittaa, että koneesta saadaan enemmän vääntömomenttia. Vaimennuskäämien rakentaminen onnistuu taloudellisemmin roottorin kestopagneettien ollessa upotettuina. Uppokestopagneettiroottoreissa induktanssit eroavat toisiinsa nähden huomattavasti siten, että pitkittäisinduktanssi on poikittaisinduktanssia pienempi. (Gieras 2002: 195; Pyrhönen 2005: 7.49).

Kestomagneettien erilaisia sijaintivaihtoehtoja roottorissa esitetään kuvassa 10.



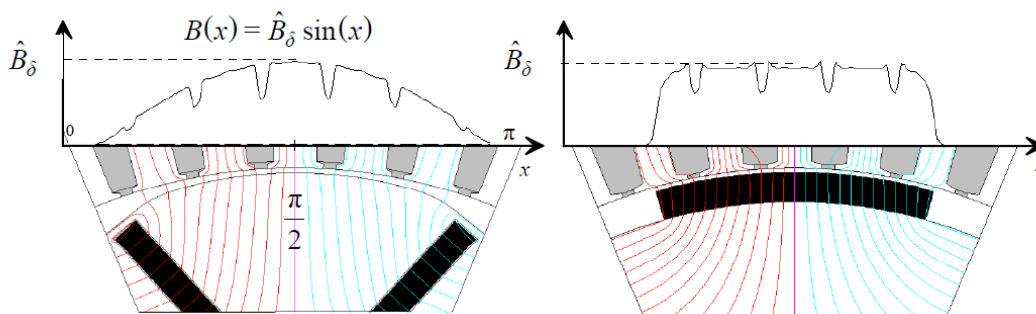
**Kuva 10.** Roottorirakenne vaihtoehtoja (Pyrhönen 397).

Roottorin rakennevaihtoehdot ovat

- a) pinnalle asennetut magneetit,

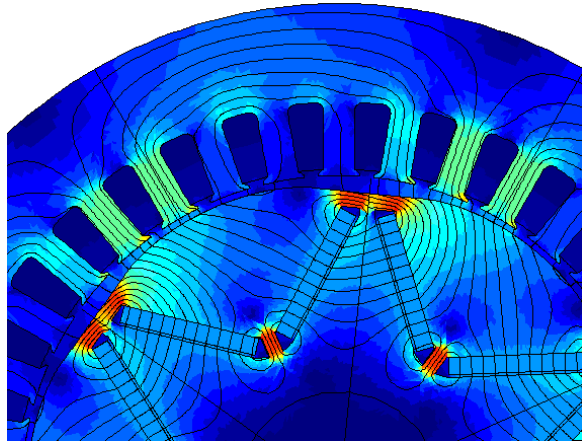
- b) pintaan upotetut magneetit,
- c) roottori, jossa on napakengät,
- d) tangentiallisesti upotet magneetit,
- e) radiaalisesti upotetut magneetit,
- f) kaksi magneettia napaa kohti, kutsutaan myös V-muotoinen naparakenne,
- g) reluktanssiroottori, jossa kestmagneetit.

Kuvassa 11 nähdään miten magneettien sijainnilla ja muotoilulla voidaan vaikuttaa vuontiheysaallon muotoon ilmapälissä. Verrattuna upotettuja V-tyyppisiä magneettia pinta-  
magneetteihin tyhjäänissä huomataan, että upotettujen magneettien vuontiheysaalto on sinimuotoisempi kuin pintamagneeteilla. (Heikkilä 2002: 49).



**Kuva 11.** Vuontiheysaallon eroavuudet uppo- ja pintakestmagneetilla (Heikkilä 2002: 49).

Kuvassa 12 esiintyy tilanne, jossa sähkölevyissä esiintyy kyllästymää. Kyllästymisilmiö huomataan staattorin hampaissa, selässä ja navoissa sekä roottorissa, magneettien välisessä sekä magneetti-ilmapälkien välisissä kannaksissa. Väritys kertoo vuontiheydestä ja mustat vuoviivat kuvaavat magneettivuon kulkureittiä. Kyllästymisen tarkoittaa magneettivuon johtavuuden pienenemistä, joka aiheutuu magneettivuon pakkautumisesta. Korkea magneettikentän vuontiheys esiintyy punaisena värinä ja tiheet vuoviivat kertovat materiaalin kyllästymisestä. Kyllästymisen näkyy sähkökoneessa toiminta-arvoissa häviöiden ja virran kasvuna sekä tehokertoimen pientymisenä.



**Kuva 12.** Sähkölevyn kyllästymä (Kolehmainen 2012)

### 3 KESTOMAGNEETTIMATERIAALIT JA NIIDEN OMINAISUUDET

Magneettiset materiaalit jaetaan magneettisuutensa perusteella dia-, para- ja ferromagneettisiksi. Ferromagneettinen materiaali on ns. magneettisesti kova materiaali, joka magnetoituu hyvin voimakkaasti ja säilyttää magneettisuutensa ulkoisen magneettikentän poistuttua. Paramagneettista materiaalia kutsutaan pehmeäksi magneetiksi, jonka magneettisuus on riippuvainen ulkoisesta magneettikentästä, mikäli ulkoinen kenttä poistetaan paramagneetin magneettisuus heikentyy huomattavasti. Paramagneetilla suhteellisen permeabiliteetin arvo on suurempi kuin yksi.

Kestomagneettihtigeneraattorin roottorin kestopagneeteissa käytetään ferromagneettista materiaalia. Ferromagneettisen materiaalin suhteellisen permeabiliteetin  $\mu_r$  arvo on huomattavasti suurempi kuin yksi. Permeabiliteetti  $\mu$  kuvaa magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden suhdetta

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad (14)$$

Ferromagneettinen aine jää pysyvästi magnetoiduksi eli kyseessä on kestopagneetti. Ferromagneettisia materiaalia ovat rauta, nikkeli ja koboltti sekä niiden johdannaiset. Näitä materiaaleja kutsutaan myös harvinaisiksi maametalleiksi. Sähkökoneteollisuudessa arvostetaan harvinaisten maametallien korkeaa remanessivuontiheyttä, koersitiivikentän voimakkuutta, resistiivisyyttä, energiatuloa sekä Curie-lämpötilaa. Lisäksi materiaalin mekaaniset sekä kemialliset ominaisuudet, kuten magneettien korroosionkesto, lujuus, kovuus, hauraus ja muotoiltavuus, vaikuttavat materiaalivalintaan.

Curie-lämpötila  $T_c$  on lämpötila, jonka yläpuolella ferromagneettinen aine menettää magneettiset ominaisuutensa ja muuttuu paramagneettiseksi. Yleisenä periaatteena voidaan pitää, että mitä korkeampi on lämpötila sitä heikommät ovat kestopagneettimateriaalin magneettiset ominaisuudet. Kestomagneettimateriaaleille on tyypillistä korkea remanessivuontiheys  $B_r$ , jolla tarkoitetaan jäännösmagnetismia eli kappaleen säilymistä magneettisena ulkoisen magnetoinnin loputtua. Mitä isompi on magneetin jäännösvuontiheys sitä

suurempi on ilmvälivuontiheys, joka muodostaa vääntömomenttia ilmvälissä. Jäännös-magnetismi on riippuvainen lämpötilasta. Normaali koersitiivivoima  $H_c$  on vastakkai- sessa kentässä oleva voima, jolla kestopagneetti säilyttää magneettisuutensa. Luonnolli- nen (engl. intrinsic) koersitiivinkentän voimakkuus  $H_{ci}$  kertoo, miten paljon kestopag- neetti pystyy vastustamaan demagnetisaatiota vastakkaisessa magneettikentässä.

Resistiivisyys on tärkeä ominaisuus kestopagneettimateriaalissa. Mitä resistiivisempi on kestopagneettimateriaali sen vähemmän syntyy pyörrevirtoja ja häviöitä. Kestopagneet- timateriaalien koostumuksella voidaan vaikuttaa resitiivisyyteen. (Pyrhönen 2005: 3:46).

Kestopagneettien taloudellisuutta kuvataan energiatulon maksimilla  $BH_{\max}$ . Tämä las- kennallinen ominaisuus kertoo kestopagneettien määrän tarpeen koneessa. Energiatulon maksimi on verrannollinen magneettikentän voimakkuuden ja remanssivuontiheyden tu- loon. Energiatulo voidaan esittää myös remanssivuontiheyden ja permeabiliteettien avulla

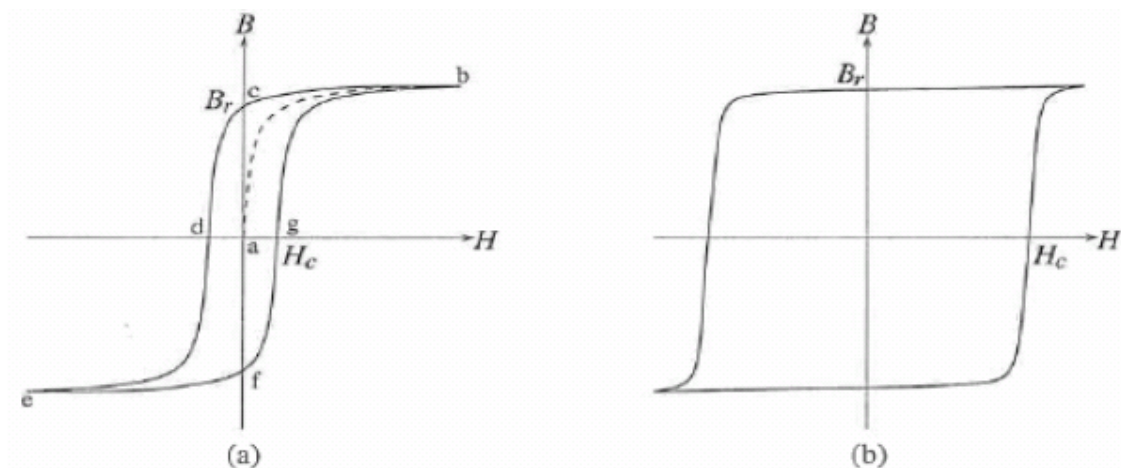
$$(BH)_{\max} = \frac{B_r^2}{4\mu_0\mu_r}, \quad (15)$$

missä  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti. Mitä isompi on energiatulo, sitä vähemmän tarvitaan materiaalia ja täten voidaan vaikuttaa koneen fyysiseen kokoon.

Hystereesisilmukan muodosta voidaan analysoida magneettikentän ja magneettivuon ti- heyden muutokset toisiinsa nähden. Kullakin materiaalilla on tyypillinen hystereesisil- mukansa, josta voidaan määrittää materiaalille ominaisia lukuarvoja. Kuvassa 13 on esi- teltty pehmeän ja kovan ferromagneettisen materiaalin hystereesikäyrä. Pehmeällä mate- riaalilla hystereesisilmukka on huomattavasti kapeampi kuin hyvät magneettiset ominai- suudet omaavalla ns. kovalla kestopagneettimateriaalilla.

Kuvan 13 a-pisteessä materiaali on magnetoitumaton. Ulkoista magnetointikenttää kas- vatettaessa lisääntyy ei-lineaarisesti materiaalin magnetointi kunnes se saavuttaa kylläs-

tymispisteen kohdassa b, jossa materiaalin magneettisuus ei enää muutu. Ulkoista magneetointia vähennettäessä saavutetaan c-piste, jossa koersitiivikentän voimakkuus on nolla, materiaali säilyy edelleen magneettisena, koska siinä vaikuttaa remanenssivuotiheys.



**Kuva 13.** Hystereesisilmukoita. Pehmeän ferromagneettisen aineen hystereesisilmukka (a) ja kovan ferromagneettisen aineen hystereesisilmukka (b). (Harnfors 2003: 23).

Kestomagneettien magneettisuus perustuu jäännösmagnetismiin, jonka vuoksi ferromagneettisilla kestopagneeteilla laaja hystereesisilmukka. Remanenssivuon vähentyessä ns. polvipisteessä alkaa materiaalin demagnetoituminen. Pisteessä d materiaali on demagnetoitunut. Vastakkainen ulkoinen magneettikenttä lisää intrinsiittistä koersitiivikentän voimaa, jolloin vastakkaisuuntainen magnetointi alkaa. Pisteessä e materiaali on kyllästynyt, mutta vastakkaisuuntaisessa magneettikentässä. (Haavisto 2013: 14–15).

Hystereesisilmukan toisessa neljänneksessä sijaitsevilla BH- ja JH-käyristä voidaan tutkia kestopagneetin ominaisuuksia eri lämpötiloissa. BH-käyrä esitetään remanenssivuontiheyden ja koersitiivikentän voimakkuuden funktiona. BH-käyrän lineaarisuus on riippuvainen materiaalin permeabiliteetistä. JH-käyrä määrittelee magneettien polarisaation J intrinsiittisen koersitiivikentän voimakkuuden funktiona. BH- ja JH-käyrien riippuvuus toisistaan voidaan esittää yhtälöllä

$$J = B - \mu_0 H.$$

(16)

JH-käyrän polven neliöllisyydestä voidaan päätellä magneettisia ominaisuuksia, mitä neliöllisempi on JH-käyrä on sitä paremmat magneettiset ominaisuudet materiaalilla on. Neliöllisyyskerroin voidaan määrittellä matemaattisesti. (Haavisto 2013: 36–38).

### 3.1 Magneettiset materiaalit

Kestomagneettitahtikoneessa käytetyt ferromagneettiset materiaalit voidaan jakaa ominaisuuksien perusteella ryhmiin: ferriitit, alumiini-nikkeli-koboltti (AlNiCo), harvinaiset maametallit kuten neodyymi-rauta-boori (NdFeB) ja samarium-koboltti (SmCo). Taulukossa 1 on annettu tyypilliset lukuarvot ominaisuuksille. Näissä lukuarvoissa voi esiintyä hieman vaihtelua johtuen materiaaliseoksesta, valmistajasta sekä valmistusmenetelmästä. Taulukon kertoimet,  $\alpha$  ja  $\beta$  ovat lämpötilakertoimia.  $\alpha$  on lämpötilakerroin remanenssi-voelle ja  $\beta$  lämpötilakerron koersitiivikentälle. Kertoimet määrittävät palautuvan polarisaation arvon lämpötila-alueella 20°C–100°C.  $H_s$  on magneettikentän arvo, jossa magneettivuo kyllästyy.  $T_c$  on kompensoitu lämpötila. (Trout, Wooten 2003: 59–60).

**Taulukko 1.** Kestomagneettien ominaisuudet lukuarvoina (Trout, Wooten 2003: 59–60).

Property	Ferrite	Alnico	SmCo			NdFeB	
	Ceramic 8	Alnico 5	1-5	1-5 TC	2-17	Bonded	Sintered
$B_r$ (kG)	4.0	12.5	9.0	6.1	10.4	6.9	13.4
$\alpha$ (%/°C)	-0.18	-0.02	-0.045	-0.001	-0.035	-0.105	-0.12
$(BH)_{max}$ MGOe	3.8	5.5	20	9	26	10	43
$H_{ci}$ (kOe)	3.3	0.64	30	30	25	9	15
$\beta$ (%/°C)	+0.4	-0.015	-0.3	-0.02	-0.3	-0.4	-0.6
$H_s$ (kOe)	10	3	20	40	30	35	35
$T_c$ (°C)	460	890	727	729	825	360	310

Kestomagneettien ominaisuuksien suoritusarvot ovat siis valmistajakohtaisia. Suoritusarvot ilmoitetaan SI- tai CGS-yksikköinä, taulukon 2 mukaisesti.

**Taulukko 2.** CGS- ja SI-yksiköiden väliset muuntosuhteet.

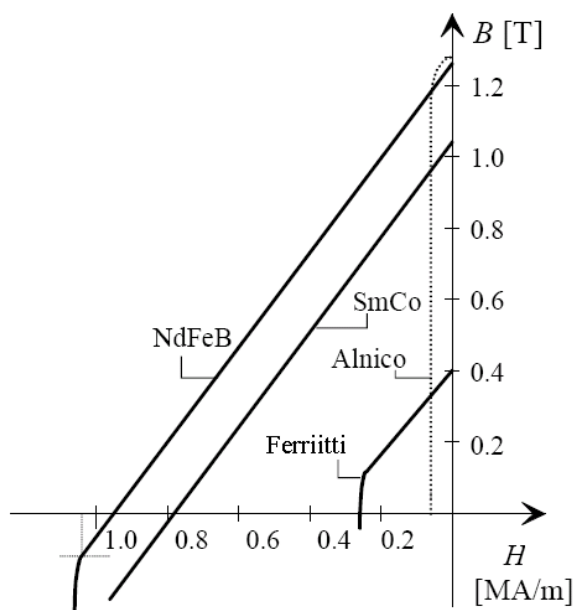
Designation	CGS	SI	Conversion
H	Oersted (Oe)	A/m	1 A/m = $12.57 \times 10^3$ Oe
B	Gauss (G)	Tesla (T)	1 T = 10,000 G
$\phi$	Maxwell (M)	Weber (Wb)	1 Wb = $10^8$ M
F	Gilbert	Amp-turn	1 A-t = 1.256 Gilbert
BH	MGOe	Joule/m <sup>3</sup>	1 J/m <sup>3</sup> = $.1257 \times 10^6$ GOe

### 3.1.1 Ferriitit

Ferriitti on kehitetty 1950-luvulla kestmagneettimateriaali, joka koostuu raudasta ja metalliseoksista. Pääasiallisena raaka-aineena on käytetty rautaa. Ferriittiä kutsutaan myös keraamiseksi magneetiksi. Ferriitti on materiaalina edullinen. Lisäksi sillä on korkea käyttölämpötila ja resistiivisyys, mikä vähentää pyörrevirtahäviöitä. Näiden etujen vuoksi ferriittiä on käytetty paljon kestmagneeteissa. Ferriitin huonona puolena voidaan pitää alhaista remanenssivuontiheyttä sekä koersitiivikentän voimakkuuden vähäisyyttä verrattuna muihin kestmagneettimateriaaleihin. Ferriitti onkin menettänyt suosiotaan muille kestmagneettimateriaaleille juuri heikkojen magneettisesten ominaisuuksiensa vuoksi. Ferriitti on silti yleisin ja edullisin materiaali. Sitä käytetäänkin monipuolisesti eri sovelluksissa kuten erottimet, kytkimet, sähkökoneet, sensorit ja autoteollisuus. (Tuusa 2004:135–136; Nurmi & Kump. 2011: 13–15).

### 3.1.2 Alumiini-nikkeli-koboltti -magneetit

AlNiCo-kestmagneetti koostuu alumiini-nikkeli-koboltti- ja rauta-aineosista. Sen etuna voidaan pitää korkeaa remanenssivuontiheyttä ja lämpötilakestoaa. Ongelmana on heikko intrinsiittinen koersiivikentän voimakkuus, jonka vuoksi materiaali demagnetoituu varsin helposti. Tämä rajoittaa AlNiCon monipuolista käyttöä, lisäksi sen demagnetoitumiskäyrä on epälineaarinen, mikä hankaloittaa sen matemaattista mallintamista. (Gieras & Wing 2002: 50–51).



**Kuva 14.** Eräiden kestopagneettimateriaalien demagnetoitumiskäyrä. (Heikkilä 2002: 15).

### 3.1.3 Samarium-koboltti -magneetit

SmCo-tyyppinen kestopagneetti koostuu eri määristä samariumia, kobolttia sekä pienistä määristä rautaa sekä muita alkuaineita. Samarium-koboltti-magneetit voidaan seoksen mukaisesti jaotella:  $\text{SmCo}_5$  (SmCo 1:5) ja  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  (SmCo 2:7), kuten taulukossa 1 on esitetty. SmCo-magneeteilla on suuri koersiivikentän voimakkuus sekä remanenssivuontiheys. Lisäksi remanenssivuontiheyden lämpötilakerroin on matala. SmCo-kestopagneeteilla on lineaarinen demagnetoitumiskäyrä, kuten kuvasta 14 voidaan todeta. Magneetin käyttölämpötila on noin 250–300 °C. SmCo-magneettityypin käyttökohteina ovat erityisesti sovellukset joissa vaaditaan huomattavan korkeaa lämpötilaa kuten sähkökoneet, auto-, avaruus- ja aseollisuus. Kobolttin ja Samariumin jalostaminen on kallista, mikä näkyy SmCo-magneettien korkeissa hinnoissa. (Tuusa 2004: 135–136; Nurmi & kump. 2011: 13–15).

### 3.1.4 Neo-magneetit

Kestomagneettimateriaalien viimeisin tulokas on NdFeB-magneettityyppi, joka koostuu neodyymistä, raudasta sekä boorista. NdFeB-materiaalilla on suurempi koersitiivikentänvoimakkuus ja remanenssivuontiheys kuin SmCo-materiaalilla, kuten kuvasta 14 voidaan todeta, mutta sen lämpötilankestävyys on noin 200 °C, mikä on heikompi kuin SmCo-materiaalilla. Lisäksi NdFeB on materiaalina herkkä korroosiolle, jonka vuoksi magneetti pinnoitetaan korroosiota ehkäisevällä materiaalilla, esimerkiksi nikkelillä. NdFeB-magneetteja kutsutaankin valmistustavan mukaisesti sintratuiksi magneeteiksi. NdFeB-materiaali on kehittynyt huomattavasti viimeisen 20 vuoden aikana kuin magneettisilta sekä lämmönkeston ominaisuuksiltaan. Materiaalin käyttöä kuitenkin rajoittaa kallis hinta. Käyttökohteet ovat samat kuin SmCo-magneeteilla. (Tuusa 2004:135–136), (Nurmi & kump. 2011: 13–15).

### 3.1.5 Polymeerisidonnaiset kestomagneetit

Polymeerisidonnaiset magneetit ovat kasvattamassa suosiotaan. Kaikkiin edellä mainittuihin kestomagneettityyppihin voidaan lisätä polymeerisiä seoksia. Polymeeriset kestomagneetit ovat helposti muokattavissa ja niitä käytetäänkin mm. pienitehoisissa askel- ja tasavirtamoottoreissa, takometreissa, leluissa ja puhelimissa (Pyrhönen 2005: 3.41).

Kestomagneettien materiaalivalinnalla voidaan vaikuttaa kestomagneettigeneraattorin kuormituksen tasoon. SmCo-materiaali kestää parhaiten kuumia käyttöolosuhteita, mutta sen magneettiset ominaisuudet ovat heikommat kuin NdFeB:llä. Tutkittavassa kestomagneettitahtigeneraattoriprotossa kestomagneettimateriaalina käytettiin Neorem 495 -kestomagneetteja, jotka ovat NdFeB-materiaalia.

## 3.2 Kestomagneetin demagnetoituminen

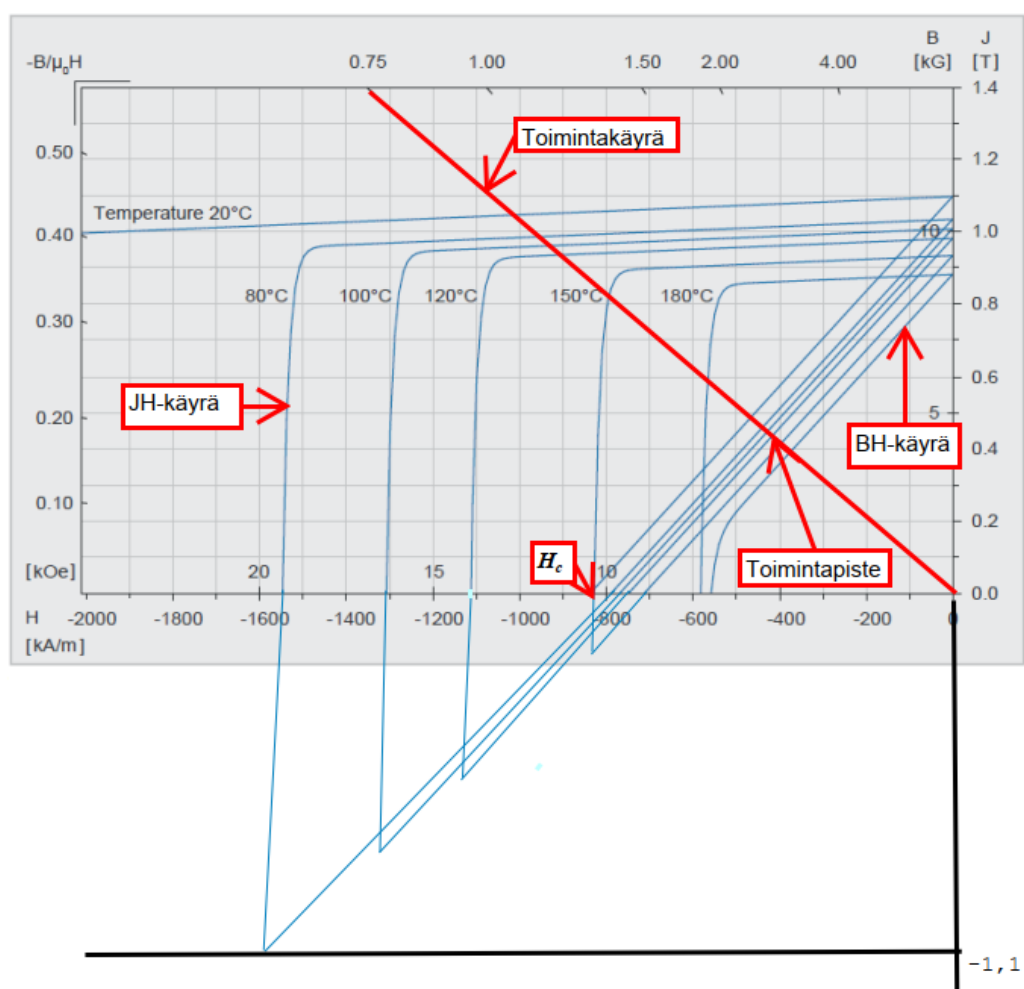
Pysyvä demagnetoituminen tarkoittaa kestomagneetissa magneettisen polarisuuden menettämistä. Demagnetoituminen voi aiheutua sähkökoneen ylikuormituksesta, roottorin

herkkyydestä termisille muutoksille tai oikosulkutilanteesta, jonka seurauksena magneettiin syntyy korkeita virtapiikkejä, jotka lisäävät demagnetoitumisen riskiä. Demagnetoituminen aiheuttaa ei-toivottuja ominaisuuksia sähkökoneen suoritusarvoissa ja toiminnassa. Pahimmassa tapauksessa seurauksena sähkökoneen tuhoutuminen. Kestomagneettien vaurioituminen mekaanisesti voi aiheuttaa myös demagnetoitumista, joten kestomagneettien käsittely vaatii myös huolellisuutta. Käytännön mittauksissa kestomagneettitahtikoneissa demagnetoituminen havaitaan virran kasvuna sekä tehokertoimen pientymisenä, joiden seurauksena koneen lämpenemä kasvaa. Häviöiden ja lämpenemän kasvaessa kestomagneettien ominaisuudet sekä toiminta-alue muuttuvat alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna.

IEC/TR 62518 -standardissa käsitellään lämpötilan vaikutuksia harvinaisten maamagneettien vuonmuutoksiin. Materiaalin vuonmuutokset voidaan jaotella kolmeen eri ryhmään: palautuva, palautumaton sekä pysyvä vuonmuutos. Haavisto käsittelee väitöksessään samaa ilmiötä polarisaation avulla. Palautuvassa polarisaatiossa materiaalin polarisaatio vähenee lämpötilan nousemisen seurauksena, mutta lämpötilan laskeuduttua polarisaatio palautuu alkuperäiseen tasoon. Palautuva polarisaatio voidaan määrittellä lämpötilakertoimien avulla. Palautumattomassa polarisaatiossa vuo ei palaudu enää alkuperäiselle tasolle lämpötilan laskiessa. Tämä ilmiötä voidaan kutsua osittaiseksi demagnetisaatioksi, joka näkyy BH-käyrän kulmakertoimen ja remanenssivuontiheyden pientymisenä. Pysyvässä polarisaatiossa magneetin polarisaatio on menetetty eikä palautumista enää tapahdu, jolloin voidaan puhua pysyvästä demagnetisaatiosta. (Haavisto 2013: 33–36).

Haaviston tutkimus sintrattujen NdFeB-magneettien aikariippuvasta demagnetisaatiosta osoittaa, että kestomagneetit myös menettävät polarisaatiota ajan kuluessa. Polarisaation menettämistä ajan funktiona kuvataan magneetin viskositeettikertoimen avulla, joka on riippuvainen lämpötilasta, vastakkaisesta magneettikentästä, materiaalityypistä sekä magneettisesta historiasta. Viskositeetin pienentymisellä sintratulla NdFeB-kestomagneettityypillä ei kuitenkaan ole käytännön vaikutusta koneen noin 30 vuoden elinikään, joten sen huomioiminen mallinnuksessa on tarpeetonta. (Haavisto 2013: 74).

Kestomagneettivalmistaja yleensä ilmoittaa tyypilliset toiminta-arvot kuten jäännösvuontiheyden, koersitiivikentät ja energiatulon arvoissa kestopagneettien datalehdet ja käyrästössä. Toiminta-arvoilla on myös toleranssit. Kuvan 15 mukaisesta kestopagneetin BH-käyrästä voidaan tulkita lämpötilojen ja vuontiheyksien riippuvuutta toisistaan, mutta samalla pystytään määrittämään ns. turvallinen toiminta-alue, jossa ei ole vaaraa demagnetisaatiosta. Mikäli toimintapiste on BH-käyrän lineaarisella osuudella ns. polven yläpuolella, tällöin demagnetisaatiosta ei ole vaaraa magneeteille. Mikäli toimintapiste on BH-käyrän polven alapuolella niin tällöin tapahtuu demagnetisoituminen. Ruoho opastaakin tutkimuksessaan tarkastamaan kestopagneetin korkeimman lämpötilan ja alhaisimman vuontiheyden toimintapisteen BH-käyrältä määrittäessä demagnetoitumisriskiä. (Ruoho 2007: 181–184).



**Kuva 15.** Neorem 495a -tyypin JH/BH-käyrä toimintapisteineen. (Neorem 2019)

Kuvasta 15 havaitaan, että Neorem 495a -tyyppinen kestmagneetti sallii -1,1 T remanenssivuontiheyden 80 °C lämpötilassa demagnetoitumatta, mutta lämpötilan noustessa 180 °C demagnetoituminen alkaa 0,2 T vuontiheydessä. Vuontiheyden tulisi olla suurempi kuin 0,2 T, jotta degmagnetisaatiolta vältyttäisiin 180 °C:ssa.

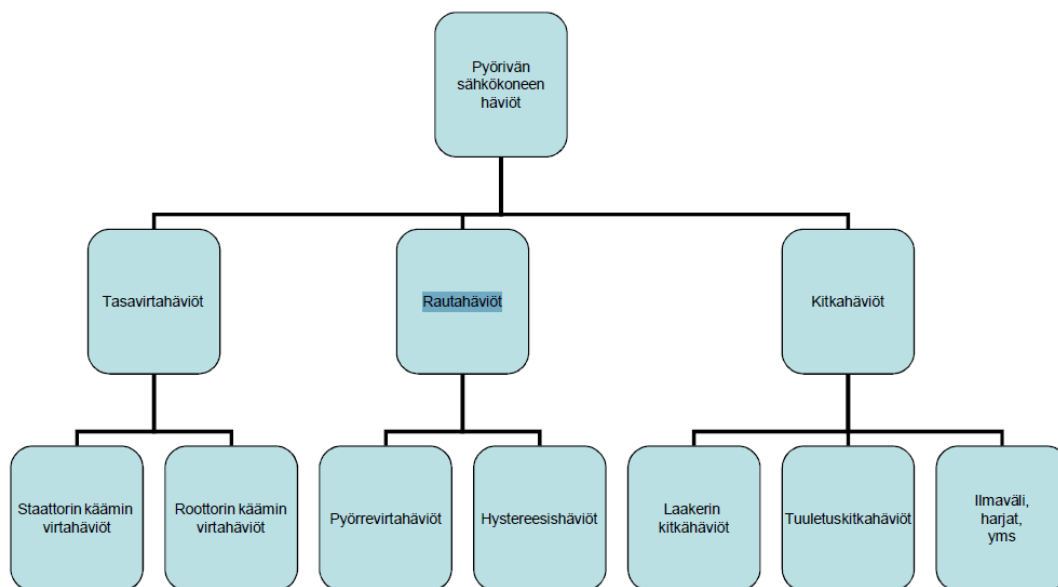
Mikäli materiaalilla on demagnetoitumisriski, ts. alhainen vuontiheys ja korkea lämpötila, niin kestmagneettimateriaali tulisi vaihtaa korkeampaan intriisitiseen koersitiivinkentän omaavaan materiaaliin, jolloin magneettinen materiaali on tiheämpää, jonka seurauksena toimintapisteen sijainti BH-käyrällä nousee ylemmäs. Demagnetoitumisriskiä sähkökoneessa voidaan vähentämällä kuormitusta sekä ankkurireaktiota. Toisaalta nämä vaikuttavat heikentävästi koneen suoritusarvoihin. (Ruoho 2007: 181–184).

## 4 KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN HÄVIÖT

Sähkökoneen hyötysuhde kuvaa ulostulevan ja sisään menevän tehon suhdetta, ts. kuinka paljon sähkökoneen läpi virtaavasta energiasta pystytään käyttämään hyödyksi. Voidaan todeta, että häviöt määräävät sähkökoneen hyötysuhteen. Pyrkimällä minimoimaan häviöitä saavutetaan parempi hyötysuhde. Oikosulkukoneet on luokiteltu standardissa IEC 60034-30-1:2014 hyötysuhde- eli IE-luokkiin. Tämä luokitus kertoo sähkökoneen energiatehokkuudesta. Mitä korkeampi luokka on sitä parempi sähkökoneen hyötysuhde ja sitä paremmin häviöt on onnistuttu minimoimaan. Kestomagneettitahtigeneraattoreilla ei ole olemassa omaa IE-luokitusta. Sähkökoneet, joita säädetään taajuusmuuttajalla, on standardissa lievennetty hyötysuhdevaatimuksien osalta tai ne jätetty kokonaan standardien ulkopuolelle tällä hetkellä. Hyötysuhdevaatimukset tulevat laajenemaan lähitulevaisuudessa koskettamaan myös taajuusmuuttajakäyttöisiä sähkökoneita.

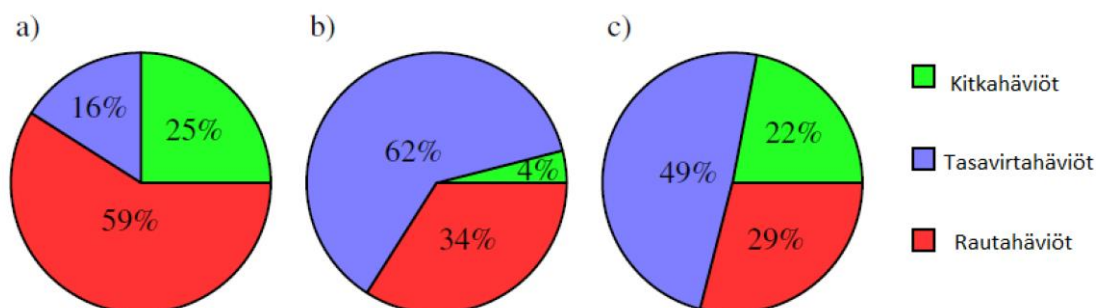
Standardi IEC60034-30-1:2014 määrittelee hyötysuhdevaatimuksen -20... +60 celsiusasteen ympäristönlämpötilassa ja 4000 metrin asennuskorkeuteen suhteessa merenpinnan tasoon olevia suoria verkkokäyttöjä. Ulkoiset olosuhdetekijät, kuten ympäristölämpötila ja ilmanpaine, on huomioitava sähkökoneen mitoituksessa.

Sähkökoneen häviöt jaotellaan standardin IEC 60034-2-1: 2014 mukaisesti kuormasta riippuviin ja riippumattomiin häviöihin, joita ovat magnetointi-, lisä- ja oikosulkuhäviöt. Tässä työssä häviöiden jaottelua on yksinkertaistettu siten, että häviöitä käsitellään sähköisinä ja mekaanisina häviöihinä. Sähköiset häviöt jaotellaan kuvan 16 mukaisesti tasavirta- ja rautahäviöihin. Tasavirtahäviöt jaetaan staattorissa ja roottorissa syntyviin häviöihin. Rautahäviöt voidaan vielä eritellä tarkemmin pyörrevirta- ja hystereesihäviöihin. Mekaaniset eli kitkahäviöt aiheutuvat tuulettimesta ja laakereista. Kestomagneettitahtikonetta ohjataan yleensä taajuusmuuttajalla. Tämä käyttökniikka aiheuttaa harmonisia yliaaltoja ja epäsymmetrisiä komponentteja vaihevirtaan. Näitä ilmiöitä käsitellään lisähäviöinä.



**Kuva 16.** Häviöiden jaottelu (Kolehmainen 2012).

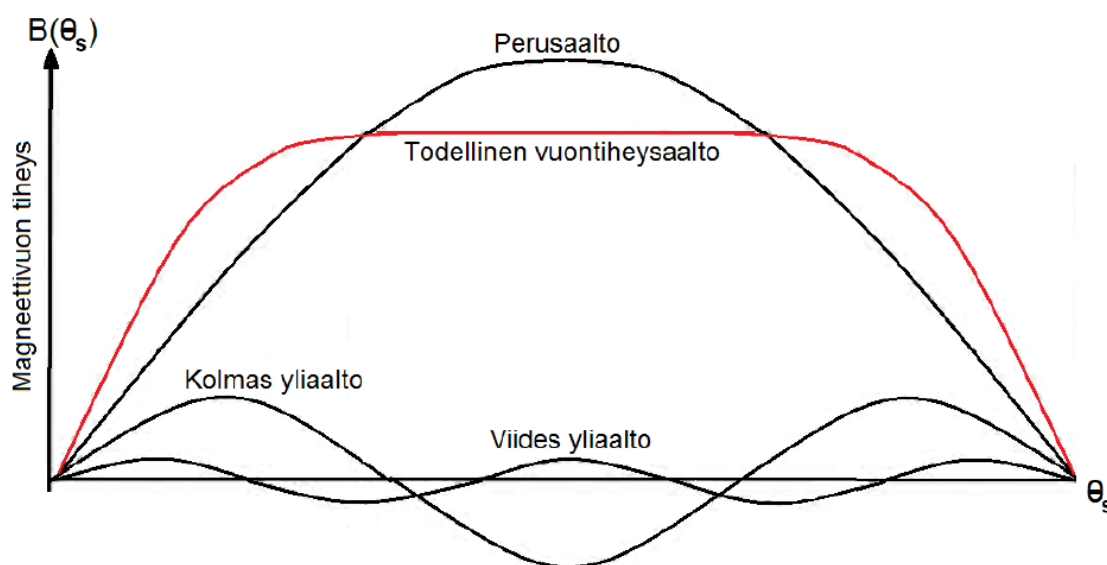
Kuvassa 17 on esitelty kolmen eri tyyppisen sähkökoneen häviömuodostumaa kitka-, tasavirta- ja rautahäviöiden osalta. Kohdassa a on 110 kW suurnopeuskestomagneetti-generaattori, joka pyörimisnopeus on 51 000 rpm, kohdassa b on 11 kW oikosulkukone pyörimisnopeudella 1470 rpm ja kohdassa c on uraton kestomagneettimoottori, jonka pyörimisnopeus 36 000 rpm. Voidaankin todeta, että tasavirtahäviöitä esiintyy eniten hitaissa ja isoissa sähkökoneissa. Vastaavasti suurnopeuskoneilla esiintyy eniten mekaanisia- ja rautahäviöitä. (Krings 2014: 11).



**Kuva 17.** Häviöiden jakaantuminen kolmessa eri sähkökonetyypissä (Krings 2014: 11).

#### 4.1 Yliaaltojen muodostuminen

Harmoniset yliaallot vaikuttavat haitallisesti sähkökoneen toimintaan. Ne aiheuttavat sähkökoneessa häviöitä, vääntömomentin epätasaisuutta, tärinää ja ääntä. Sähkökoneen ilmajälissä vaikuttaa vuontiheyden perusaallon lisäksi useita vuontiheyden yliaaltoja. Harmoniset yliaallot ovat perusaallon taajuuden kerrannaisia, jotka summautuessaan aiheuttavat säröytymää sinimuotoiseen aallonmuotoon. Kuvassa 18 esitetään kolmannen ja viidennen yliaallon vaikutus vuontiheysaaltoon.



**Kuva 18.** Yliaaltojen vaikutus vuontiheysaaltoon (Vesala 2011: 34).

Fourier-muunnosta soveltamalla voidaan ratkaista todellinen vuontiheysaalto, joka vaikuttaa ilmajälissä

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_0 t + b_k \sin k\omega_0 t), \quad (17)$$

missä  $a_0$ ,  $a_k$  ja  $b_k$  ovat Fourier-sarjan kertoimia,  $k$  on yliaallon järjestysluku ja  $\omega_0$  on perustaajuuden komponentin kulmanopeus. (Niiranen 2001: 143–144). Funktion  $f(t)$  ollessa parillinen katoaa sinikomponentti, vastaavasti parittomalla funktiolla katoavat kosini-komponentti.

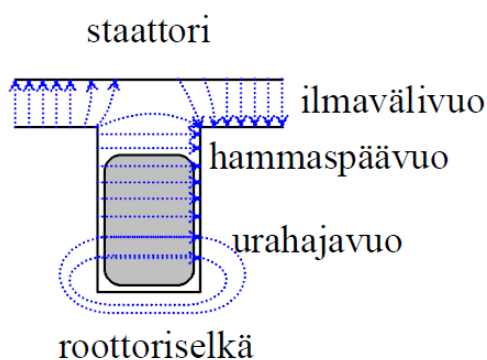
Yliaallot voidaan jakaa positiiviseen, negatiiviseen ja nollakomponenttiin järjestyslukunsa perusteella. Komponenttitasosta päätellään yliaallon pyörimissuunta perustaajuuteen nähden. Positiiviset yliaallot aiheuttavat magnettikentän ja virran, joihin kuuluvat perusaallon, jonka järjestysluku 1, sekä järjestysluvut 4,7,10,13,16,19... . Positiiviset yliaallot pyörivät saaman suuntaan kuin perusaalto. Perusaallon vastakkaiseen suuntaan pyörivä yliaalto esiintyy järjestysluvuilla 2,5,8,11,14,17,20... . Näitä yliaaltoja kutsutaan negatiivisiksi yliaalloiksi. Nollakomponentit, joita ovat järjestysluvut 3,6,9,15,18,21... eivät muodosta pyörivää yliaaltoa, mutta synnyttävät lisähäviöitä koneeseen. Erimerkkiset yliaallot aiheuttavat vääntäviä voimia akselissa ja tärinää roottorissa, mikä on ei-toivottu ominaisuus sähkökoneella. (Korpinen 2008; Viertokoski 2011: 30).

Yliaaltojen muodostumiseen sähkökoneessa vaikuttaa kolme tekijää: epäjatkuva käämitys, muuttuva permeanssi ilmapälissä ja ei-sinimuotoinen jännitelähde. Epäjatkuva käämitys aiheuttaa ns. uraharmonisia yliaaltoja, jotka syntyvät staattoriurissa. Permeanssin muutoksia aiheuttavat staattorissa ja roottorissa olevat ura-aukot, avonavat, materiaalien kyllästyminen sekä roottorin epäkeskeisyys. Erityisesti uran muodoilla ja määrillä pystytään vaikuttamaan yliaaltojen määrään. Vaiheharmonisilla yliaalloilla tarkoitetaan ei-sinimuotoisen syöttöjännitteen aiheuttamia yliaaltoja, joita esiintyy erityisesti taajuusmuuttajalla säädetyillä koneilla. Yliaallot aiheuttavat rauta- ja lisähäviöitä, jotka esiintyvät sähkökoneen lämpenemisenä, magneettisena äänenä ja tärinänä. Erityisesti hitaasti pyörivillä ja isotehoisilla sähkökoneilla on suuri magneettinen ääni. Ääntä aiheuttavat yliaallot ovat erityisesti staattorin ja roottorin urayliaallot sekä roottorin epäkeskeisyys ja kyllästyminen (Jokinen 1980: 20–21).

## 4.2 Hajavuot

Sähkökoneessa päämagneettivuoto synnyttää vääntömomentin ilmapälissä. Päävuosta irtautunutta magneettivuotoa kutsutaan hajavuoksi. Hajavuot eivät aiheuta varsinaisia häviöitä, mutta vähentävät koneessa syntyvää vääntömomenttia. Materiaalin kyllästyminen rajoittaa koneen toimintaa, mutta samalla se estää hajavoiden muodostumista. Hajavoiden

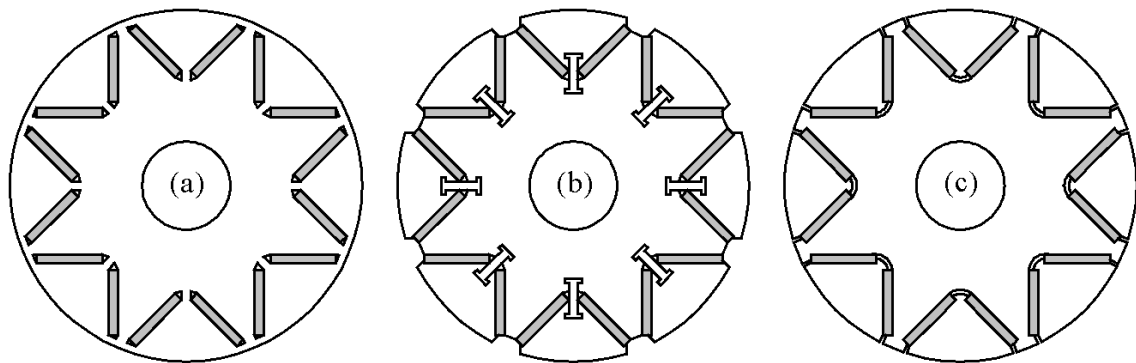
huomioiminen sähkökoneen suunnittelussa on erittäin työlästä. Yleensä hajavuot huomioidaan ns. kokemuseräisen laskennan kautta. Pyrhönen jaottelee hajavuot ilmvälisiin ja ei-ylittäviiin hajavoihin. (Pyrhönen 2005: 4.1). Kuvassa 19 esitellään hajavuot, jotka eivät ylitä ilmväliä: ura-, hammaspää-, vyyhdenpää- ja napahajavuo.



**Kuva 19.** Periaatteellinen kuva hajavoista, jotka eivät ylitä ilmväliä (Pyrhönen 2005: 4.3).

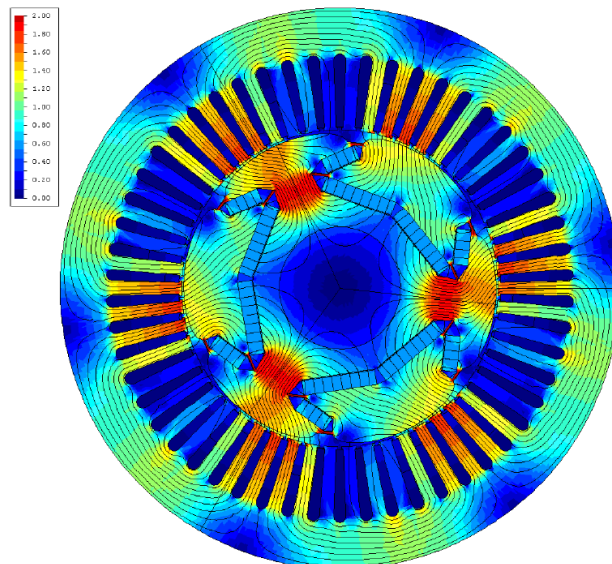
Ilmvälissä olevat hajavuot ovat riippuvaisia jäniteistyksestä, uravinoudesta ja käämitysten avaruudellisesta jakaumasta. Kestomagneettien aiheuttamia hajavoita voidaan ohjata erilaisilla mekaanisilla ratkaisuilla ja muotoilulla. (Pyrhönen 2005: 4.2–4.5).

Kolehmainen on tutkinut väitöstyössään erilaisia mekaanisia ratkaisuja magneettien aiheuttamien hajavuodon ehkäisemiseksi roottorissa. Laajentamalla magneettien välissä olevaa aluetta, josta käytetään nimitystä kannas, voidaan saada roottori mekaanisesti kestävämmäksi. Toisaalta hajavuon määrä kasvaa, mikä huonontaa koneen sähköisiä ominaisuuksia ja lisää tarvetta magneettiselle materiaalille. Kuvassa 20a on perinteinen magneettien V-asennus, mutta ohuella kannaksella, kuvassa 20b on lisätty pitkittäinen tukipalkki magneettien kannaksen väliin. Kuvan 20c rakenteessa on käytössä ns. muotosuljettuja (engl. dovetail) kestomagneetteja. Tällaisessa kestomagneettien asennuksessa roottorin hajavuot ovat pienempiä, jonka seurauksena pystytään säästämään magneettimateriaalia. Vaikka sähkökoneen mekaaninen rakenne on vahvempi verrattuna perinteiseen V-asennukseen, niin tämä ratkaisu ei ole toimiva suurnopeuskoneilla. (Kolehmainen 2011: 22).



**Kuva 20.** Eri kannasvaihtoehtoja hajavoiden ehkäisyyn. (Kolehmainen 2011: 22).

Kolehmainen esittää väitöskirjassaan kuvan 21 mukaisen lohenpyrstöliitoksen roottorirakenteen olevan ratkaisu roottorin hajavoiden ehkäisyyn suurnopeuskestomagneetti- ja synkronireluktanssikoneilla. Lohenpyrstöliitoksessa ei ole erikoisia kannaksia vaan hajavoita ohjataan kestomagneettien muotoilun avulla ja rakenne säilyy suurillakin nopeuksilla. Tämä rakennevaihtoehto säästää myös magneettista materiaalia, koska syntyvät hajavuot on pienempiä, joten kestomagneetit voidaan hyödyntää tehokkaammin. (Kolehmainen 2011: 22).



**Kuva 21.** Lohenpyrstöliitos kestomagneetikonessa (Kolehmainen 2011: P5)

Roottorin suunnittelussa suurnopeuksilla tulee huomioida aina magneettisten voimien lisäksi keskipakovoima sekä lämpölaajeminen.

### 4.3 Tasavirtahäviöt

Moottorin roottori- ja staattorikäännyksessä syntyy tasavirtahäviöitä, joita kutsutaan myös resistiiviseksi kuparihäviöiksi tai virtalämpöhäviöiksi. Kestomagneettitahti-generaattorin roottorissa ei muodostu tasavirtahäviöitä rakenteensa vuoksi, joten laskennassa huomioidaan vain staattorin käännyksessä syntyvät häviöt, jotka jaetaan vaihto- ja tasavirtahäviöihin. Tasavirtahäviöt ovat verrannollisia kuormitusvirran neliöön ja ne lasketaan Joulen lakia soveltamalla

$$P_{cu} = n3I^2R, \quad (18)$$

missä staattorikäänin resistanssi  $R$ , vaiheiden lukumäärä  $n$  ja vaihtovirran tehollisarvo  $I$ .

Vakiopoikkipintaisen johtimen resistanssi määritetään

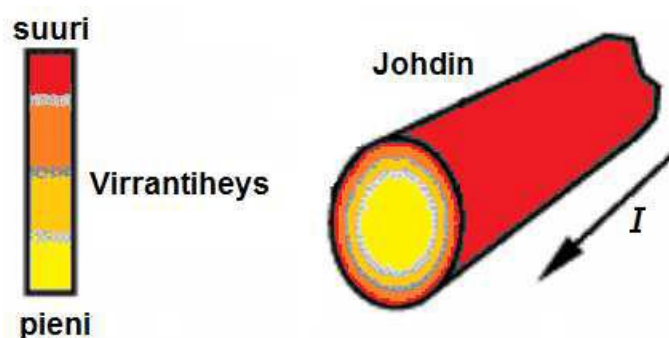
$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\gamma A}, \quad (19)$$

missä  $l$  on käänjihtimen pituus ja  $A$  on poikkipinta-ala. Resistanssiin vaikuttaa johtimien materiaalin resistiivisyys  $\rho$  tai käänteisesti ilmaistuna konduktiivisyys  $\gamma$ . Johtimen resistanssin riippuvuus lämpötilasta voidaan määrittää

$$R_2 = R_1 + \alpha R_1 (T_2 - T_1), \quad (20)$$

missä  $R_1$  on johtimen resistanssi lämpötilassa  $T_1$ , ja  $R_2$  johtimen resistanssi lämpötilassa  $T_2$  ja  $\alpha$  johdinmateriaalin lämpötilakerroin lämpötilassa  $T_1$ . Johdinmateriaalina on yleensä käytetään kuparia. Resistanssi on verrannollinen lämpötilaan. Mitä korkeampi on lämpötila, sitä suurempi on käänjihtimen resistanssi. (ABB 2000: 69).

Vaihtovirta synnyttää johtimissa vaihtelevan magneettivuon, joka puolestaan aiheuttaa ns. virranahtoa (engl. skin effect). Mitä suurempi on vaihtovirran taajuus, sitä epätasaisemmin virrantiheys on jakautunut ja sitä epäsymmetrisempi magneettikenttä on johtimessa. Johtimessa tämä näkyy virrantiheyden kasvuna johtimen pinnalla ja tiheyden pientymisenä keskiosassa kuvan 22 mukaisesti. Sähkökoneessa virranahtoa esiintyy staattorin urissa sekä vyyhdenpäissä olevissa johtimissa. Virranahto lisää johtimen resistiivisyyttä ja tämä puolestaan synnyttää häviöitä staattorissa. (Vesala 2011: 45).



**Kuva 22.** Virranahdo johtimessa (Vesala 2011: 45).

Virranahdon aiheuttamiin vaihtovirtahäviöihin voidaan vaikuttaa johtimen geometrisilla ominaisuuksilla ja sijainnilla urassa (Pyrhönen 2005: 5.2):

- käämityksen rinnakkaiset haarat,
- päällekkäin sijaitsevien johtimen erilainen korkeus,
- jaetut johtimet ja johdinosien vuorottelu eri korkeudella,
- monisäikeiset punotut johtimet, ns. Roebel-sauvat.

Käytännön konesuunnittelussa ei välttämättä huomioida vaihtovirrasta aiheutuvia vaihtovirtahäviöitä, koska niiden määrittäminen on laskennallisesti hankalaa ja niitä ei merkittävästi muodostu matalilla taajuuksilla. Tämän vuoksi vaihtovirtahäviöt käsitelläänkin lisähäviöinä. (Talvitie 2005: 50).

#### 4.4 Rautahäviöt

Rautahäviöt voidaan jakaa pyörrevirta- ja hystereesihäviöiksi. Ne syntyvät muuttuvasta magneettivuosta ferromagneettisessa johtavassa materiaalissa, kuten sähkölevyssä staattorissa, roottorissa sekä kestopagneeteissa. Kestomagneettitahtigeneeraattorissa rautahäviöiden muodostumiseen vaikuttaa kestopagneettien sijainti ja muotoilu roottorissa kuten aikaisemmin on jo mainittu. Rautahäviöt ovat riippuvaisia taajuudesta. Roottorin rautahäviöitä ei välttämättä huomioida vähäisen ankkurireaktion vuoksi taajuuden ollessa matala. Toisaalta mitä korkeampi on taajuus sitä suuremmaksi muodostuvat rautahäviöt, jolloin niiden vaikutus on ehdottomasti huomioitava koneen mitoituksessa. Koneen napaluku vaikuttaa rautahäviöiden muodostumiseen. Pienillä napaluvuilla syntyy enemmän hystereesihäviötä, kun taas isoilla napaluvuilla on enemmän pyörrevirtahäviöitä. (Pyrhönen, Salminen, Parviainen & Nimelä 2005).

Pyrhösen luentomateriaalissa mainitaan myös muita rautahäviöiden syntytapoja. Rautahäviöitä syntyy ns. päätyhäviönä, jotka muodostuvat hajavuon tunkeutuessa koneen isoihin mekaanisiin rakenteisiin, kuten laakerikilpiin ja runkoon. Staattori- ja roottorihampaiden liikkeessä toistensa ohi niissä syntyy harmonisia yliaaltoja, jotka synnyttävät lisähäviötä. Tietynlaiset mekaaniset rakenteet, esim. napakengät synnyttävät pyörrevirtahäviötä. (Pyrhönen 2005: 3.36).

Rautahäviöt  $P_{fe}$  voidaan määrittää häviötiheyksinä ( $W/m^3$ ), joka muodostuu pyörrevirta-  $P_e$  ja hystereesihäviötiheyksien  $P_h$  summasta

$$P_{fe} = P_h + P_e = k_h B_{\max}^{\beta} \omega_s + k_e B_{\max}^2 \omega_s^2, \quad (21)$$

missä on  $B_{\max}$  on maksimi vuontiheys raudassa,  $\beta$  on Steinmetzin kerroin sekä hystereesi- ja pyörrevirtakertoimet  $k_h$  ja  $k_e$  ovat riippuvaisia levymateriaalista. Yleensä valmistaja ilmoittaa kertoimet. Vuontiheyden aallonmuodon oletetaan olevan sinimuotoisesti vaihtelevaa. (Chunting 2001: 2585).

Rautahäviöiden määrittäminen on laskennallisesti todella haastavaa, koska ne ovat riipuvaisia magneettikentän taajuudesta ja voimakkuudesta sekä materiaalista ja valmistustavasta. Rautahäviöiden määrittämiseen käytetyt ohjelmistot ja niissä käytetyt kertoimet antavat vain suuntaa-antavia laskentatuloksia. (Krings 2014: 134).

#### 4.4.1 Hystereesihäviöt

Hystereesihäviöt syntyvät materiaalin magneettivuon muuttuessa. Ulkoisen magneettikentän vaikuttessa materiaalissa olevat Weissin alueet ja Blochin seinämät pyrkivät järjestäytymään uudelleen ja saavuttamaan energiaminiminsä. Tällöin niissä tapahtuu suunnanmuutoksia, jotka ovat palautuvia tai palautumattomia. Pysyviä suunnanmuutoksia kutsutaan myös Barkhausenin hyppäykseksi, joiden seurauksena materiaalin polarisaatio muuttuu pysyvästi. Nämä suunnanmuutokset aiheuttavat kitkaa, jonka seurauksena materiaali lämpenee. Hystereesi-ilmiö kuvaa tätä fysikaalista tapahtumaa. Aikaisemmin on käsitelty hystereesinsilmukan syntyä sekä ulkoisen magneettikentän vaikutusta sen käyttökseen. Korkeilla taajuuksilla hystereesihäviöt eivät välttämättä käyttäydy lineaarisesti, johtuen Weissin alueiden kyvystä mukautua magneettikentän vaihteluun (Vesala 2011: 44). Magneettivuon tiheyden vaihteluista syntyy hystereesihäviöitä, jotka ovat verrannollisia vuontiheyteen, hystereesinsilmukan pinta-alaan ja taajuuteen (Talvitie 2005: 45)

$$P_h = f \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}. \quad (22)$$

Gieras (2007:131) esittääkin staattorin ikeessä ja hampaassa esiintyvän hystereesihäviön  $P_h \approx fB^2$  olevan verrannollisia taajuuden ja vuontiheyden neliöön. Hystereesihäviöt voidaan määrittää empiirisesti

$$P_h = \eta V f B_{max}^k, \quad (23)$$

missä  $\eta$  on kokeellinen vakio hystereesihäviöille,  $V$  on kappaleen tilavuus. Magneettivuontiheyden kerroin  $k$  vaihtelee välillä 1,5...2,5. (Pyrhönen 2009 :194).

#### 4.4.2 Pyörrevirtahäviöt

Faradayn lain mukaisesti magneettivuon muutokset indusoivat sähkömotorisen voiman ja jännitteen kestopagneetteihin sekä muissa johtavissa rakenteissa. Jännite pakottaa varauksenkuljettajat liikkumaan suljetussa virtapiirissä, jonka seurauksena materiaalissa syntyy virrantiheys  $\mathbf{J}$ . Virrantiheys on riippuvainen materiaalin johtavuudesta  $\sigma$  ja sähkökentän voimakkuudesta  $\mathbf{E}$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (24)$$

Pyörrevirtahäviöt  $P_e$  ovat riippuvaisia sähkökentän voimakkuudesta sekä materiaalin tilavuudesta ja johtavuudesta

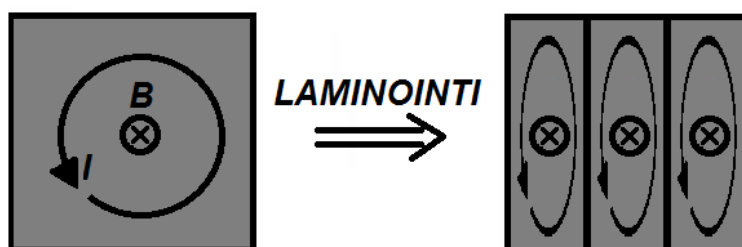
$$P_e = \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \, dV = \int_V \sigma \cdot \mathbf{E}^2 \, dV. \quad (25)$$

Pyörrevirrat pyrkivät vastustamaan vuonmuutoksia ja hankaloittamaan virran kulkemista. Voidaankin todeta, että mitä isompi on johtavan materiaalin pinta-ala on, sitä suuremmaksi pyörrevirtahäviöt muodostuvat. (Vesala 2011: 51).

Gieras esittääkin staattorin ikeessä ja hampaassa pyörrevirtahäviöiden olevan verrannollisia  $P_e \approx f^2 B^2$  eli taajuuden sekä vuontiheyden neliöön. (Gieras 2007: 131). Sähkölevyissä pyörrevirtahäviöt ovat riippuvaisia taajuudesta, levyn paksuudesta  $\tau$ , resistiivisyydestä  $\rho$  ja vuontiheyden huippuarvon neliöstä  $\hat{B}^2$  (Pyrhönen 2005: 3.34)

$$P_e = \frac{V \pi^2 f^2 \tau^2 \hat{B}^2}{6\rho}. \quad (26)$$

Sähkölevyn pyörrevirtahäviöitä voidaan vähentää materiaalin seossuhteilla, geometrialla ja laminoinnilla, jonka avulla pyörrevirran kulkua voidaan estää kuten kuvassa 23 on esitetty. (Vesala 2011: 42). Sähkölevyn materiaaliin lisätään piitä tai muita rautaseoksia johtavuuden ja pyörrevirtojen pienentämiseksi. Tämä toisaalta heikentää materiaalin kestävyyttä ja magneettisia ominaisuuksia.

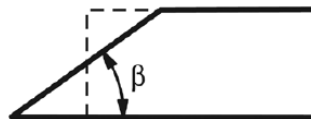


**Kuva 23.** Laminoinnin vaikutus pyörrevirtoihin. (Vesala 2011: 42).

Staattorin uraluvulla ja muotoilulla vaikutetaan myös pyörrevierrojen syntymiseen. Pyörrevirtahäviöt staattorinhampaissa ovat verrannollisia urien määrään. Urien määrää vähentämällä ja kokoa kasvattamalla voidaan vähentää staattorihampaiden pyörrevirtahäviöitä. Toisaalta kuten on jo aikaisemmin mainittu mitä isompi on uraluku sitä sinimuotoisempi on ilmavälivuontiheys. Isompaan uraan mahtuu enemmän käämilankaa, minkä seurauksena hyötysuhde paranee. Staattorin sähkölevyn väheneminen vaikuttaa heikentävästi sähkökoneen toiminta-arvoihin. Uran ollessa liian matala staattorin hampaissa oleva korkea vuontiheys aiheuttaa yliaaltoja. Sama pätee liian syvään uraan, jonka vuoksi staattoriselän rauta jää liian ohueksi. Tällöin hajavoiden vaikutus näkyy sähkökoneen rungossa lämpönä. (Viertokoski 2012: 31). Urakiilojen täytöllä voidaan vaikuttaa rautahäviöiden muodostumiseen. Täysin suljetussa urassa syntyy hajavoita, jotka vähentävät vääntömomentin muodostumista. Osittain suljetussa urassa syntyy vääntömomenttia, mutta toisaalta siellä esiintyy myös pyörrevirtahäviöitä. Mikäli ura on liian avoin, niin käämijohdot eivät pysy urassa ja syntyy yliaaltoja ilmaväliin. (Viertokoski 2012: 44; Chunting 2005: 123).

Pyörrevirtahäviöiden syntymistä voidaan vähentää kestopagneeteissa pilkkomalla ja eristämällä eli tavoitteena on katkaista pyörrevirran kulkureitti. Esimerkiksi suorakulmaisen pintamagneetin päädyn viistämisellä pystytään vähentämään pyörrevirtahäviöitä pintamagneettikoneilla, kuten kuvassa 24 esitetään. (Chunting 2005: 123).

	90	75	63	51	39	27
Tooth eddy current loss (W)	17.3	17.2	17.1	16.9	16.5	15.7
Tooth hysteresis loss (W)	10.9	10.8	10.8	10.5	10.8	10.8
Yoke eddy current loss (W)	18.1	18.1	18.1	18.0	18.0	17.8
Yoke hysteresis loss (W)	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4	22.6
Total iron loss (W)	68.7	68.7	68.5	67.8	67.5	66.1
Airgap flux ( $\times 10^{-3}$ Wb)	5.2	5.20	5.20	5.20	5.21	5.22
Tooth eddy loss reduction (%)	-	0.3	1.0	2.4	4.7	9.5
Reduction of iron loss (%)	-	0.0	0.3	1.3	1.8	3.8



**Kuva 24.** Viistokulman vaikutus pyörrevirtahäviöihin (Chunting 2005: 123).

Chunting (2005: 819) on osoittanut tutkimuksessaan, että pienennettäessä pintamagneetin viistekulmaa  $\beta$  kestomagneetin päädyssä muodostuu vähemmän pyörrevirtahäviöitä staattorin hampaissa ja ikeessä. Kuvan 24 on mittaustuloksista huomataan, että pyörrevirtahäviöt pienevät jopa noin 9,5 prosenttia ja ilmavälivuon arvo säilyy ennallaan, vaikka magneettista materiaalia vähennetään. Kestomagneetin keskikohdan ollessa leveämpi kuin sen päädyt voidaan vaikuttaa magneettivuonaallon muotoon ja täten vähentää pyörrevirtahäviötä. Vuontiheys kasvaa staattorin hampaissa, mikäli kahden vierekkäisen kestomagneetin etäisyys on urajakoa pienempi. Chuntingin kuvaa tilannetta termillä magneettien peittäminen (engl. coverage), joka määritetään kertoimella  $k$ . Optimaalinen magneettisen peittämisen kerroin määritellään

$$\frac{1}{nq} \leq k \leq \frac{nq - 1}{nq}, \quad (27)$$

missä  $n$  on koneen vaiheluku ja  $q$  on urien määrä urajakoa kohti. Mikäli peittämisen arvo  $k$  lähenee lukuarvoa 1.0 niin pyörrevirtahäviöt lisääntyvät merkittävästi. Ikeessä syntyvä pyörrevirta on käänteisesti verrannollinen magneetin napojen peittämään. (Chunting 2005: 820).

#### 4.5 Mekaaniset häviöt

Mekaaniset häviöt jaotellaan hankaus-, ilmavirta- ja tuuletinhäviöiksi. Ne syntyvät pyörivän liikkeen seurauksena. Häviöt aiheutuvat tuulettimesta, ilmavälissä olevasta tuulettinvastuksesta sekä laakereiden kitkasta. Käytännön laskennassa mekaanisia häviöitä ei välttämättä jaotella eri häviöihin vaan ne käsitellään kokonaisuutena.

Laakereiden kitka on verrannollinen lämpötilaan. Sähkökoneella, jolla on iso napaluku, laakereiden kitkan suuruus ei ole kriittinen, koska pieni pyörimisnopeus ei aiheuta lämpötilan nousua laakereissa samalla tavalla kuin sähkökoneissa, joissa on pieni napaluku. Kitkan suuruuteen laakereissa voidaan vaikuttaa pyörimisnopeuden lisäksi laakereiden koolla, tyypillä, voitelulla ja kuormalla. Pienille kestopagneettikoneille on määritelty kitkahäviöt

$$P_{fr} = k_{fb} G_r n, \quad (28)$$

missä  $k_{fb}$  on kerroin, jonka lukuarvo on väliltä 1–3,  $G_r$  on roottorin paino ja  $n$  on kierrosnopeus. (Gieras 2002: 555).

Ilmajäähdytteisillä koneilla roottorin ja staattorin välissä olevassa ilmavälissä syntyy pyörivän liikkeen seurauksena turbulensseja, jotka aiheuttavat tuuletushäviöitä. Turbulenssien aiheuttamiin häviöihin vaikuttavat roottorin pyörimisnopeus, pintojen sileys, materiaali sekä ilmavälän pituus ja väliaine.

Gieras (2005: 555) on määrittänyt 50 Hz avonapaisen tahtikonekoneen mekaaniset häviöt

$$P_{mek} = \frac{1}{k_m} (D_{1in} + 0,15)^4 \sqrt{L_i} \left( \frac{n}{100} \right)^{2,5}, \quad (29)$$

missä  $k_m$  on kerroin,  $D_{1in}$  on staattorin sisäkehän halkaisija ja  $L_i$  on staattorin efektiivinen pituus.

Sähkökoneen jäähdyttäminen tapahtuu itsetuuletettuna tai erillistuuletettuna. Itsetuuletetun sähkökoneen häviöt ovat riippuvaisia roottorin pyörimisnopeudesta, tuletinmuotoilusta ja materiaalista. Erillistuuletettuun sähkökoneeseen on lisätty erillispuhallinmoottori, joka pyörii vakionopeudella riippumatta kuormasta, jolloin häviötkin säilyvät vakioina. Erillistuuletuksella jäähdytys on tehokkaampaa ja tuuletushäviöt ovat pienemmät, jonka vuoksi erillistuuletetusta sähkökoneesta saadaan enemmän tehoa kuin saman kokoisesta itsetuulettavasta koneesta. Häviöiden kannalta sähkökoneen kuorman tyyppi ja toimintapiste ovat jäähdytystyyppivalinnassa kannalta ratkaiseva tekijä. Erikoisena jäähdytysmenetelmänä sähkökoneessa pidetään kiertävää nestejäähdytystä. Nestejäähdytteisessä sähkökoneessa on staattorirunko, jonka sisälle on rakennettu kanavia, jossa virtaa jäähdyttävää nestettä, vettä ja glykolin sekoitetta. Vesijäähdytteisestä sähkökoneesta voidaan kuormittaa noin 30 prosenttia enemmän verrattuna itsetuulettuvaan jäähdytykseen. (Hauru 2013: 19).

#### 4.6 Lisähäviöt

Lisähäviöt ovat kuormituksesta riippuvia häviötä, joita ei huomioida tasavirta- ja rautahäviönä. Lisähäviöt syntyvät roottorin selässä ja staattorin sisäpinnalla ja hampaissa. Lisähäviöihin sisällytetään myös yliaaltojen sekä hajavoiden muodostamia häviöitä, joiden mallintaminen on erityisen haasteellista. (Gieras 1997: 555).

IEC 60034-2:1996 -standardi määritteli aikoinaan oikosulkukoneiden lisähäviöiden olevan noin 0,5 prosenttia osuutena sisääntulotehosta. Tänä päivänä lisähäviöiden laskenta perustuu IEC 60034-2-1-standardiin. Käytännön konesuunnittelussa lisähäviöiden määrittämisessä käytetään apuna kertoimia, jotka voidaan tarkemmin määrittää olemassa olevien koestustuloksien perusteella. Pyrhönen määrittelee lisähäviöiden muodostuvan kuormavirran ja -tehon taajuuden tulosta

$$P_{\text{add}} = I^2 f^{1.5}. \quad (30)$$

Lisähäviöprosentti voidaan määritellä konetyyppikohtaisesti ottotehosta. Tahtikoneilla lisähäviöprosentti on 0,05–0,2 %, vastaavasti oikosulkukoneilla lisähäviöt on huomattavasti korkeammat, noin 0,3–2,0 %. (Pyrhönen 2009: 459).

Gieras on määritellyt lisähäviöt käyttäen nimellistehoja ja kertoimia, jotka on ilmaistu kestopagneettikoneiden tehon perusteella

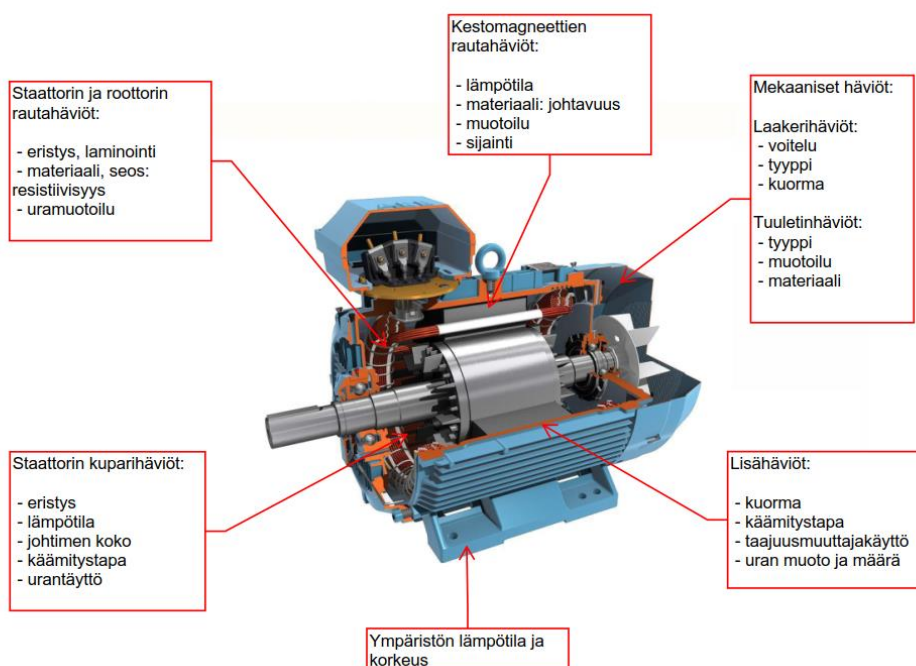
$$P_{\text{add}} = k_{\text{str}} P_{\text{out}}. \quad (31)$$

Pienten kestopagneettikoneiden, joiden nimellisteho on pienempi kuin 10 kW, lisähäviökerroin  $k_{\text{str}}$  on 0,03–0,05. Kestopagneettikoneet, joiden teholuokka on 10–100 kW, kerroin on 0,005–0,01. Isojen kestopagneettikoneiden, joiden nimellisteho on suurempi kuin 100 kW kerroin on 0,003–0,005. (Gieras 1997: 555).

Sähkökoneen ääntä ei välttämättä ajatella perinteisenä lisähäviönä. Matala äänentaso voi olla yhtä merkittävä vaatimus asiakkaalle kuin hyötysuhde. Ääntä sähkökoneessa aiheuttavat aerodynaamiset ominaisuudet, joita ovat mm. jäähdytysilman nopeat paineenmuutokset mekaanisissa rakenteissa. Sähkömagneettiset äänet syntyvät staattorin ja roottorin magneettivuon keskinäisestä voimavaikutuksesta, ja ne ovat riippuvaisia värähtelyn taajuudesta ja aallonmuodosta. Yhteensopimattomat urayhdistelmät staattorissa ja roottorissa aiheuttavat sähköistä ääntä. Mekaaninen ääni syntyy laakereiden pyöriessä tai roottorin epätasapainosta, mikä on merkittävin tekijä koneen tärinäongelmissa. Hitaissa sähkökoneissa ääni muodostuu pääasiallisesti mekaanisesta äänestä, laakereista ja sähköisestä äänestä. Nopeissa sähkökoneissa valtaosa äänistä aiheutuu tuulettimesta. (Jokinen 1980: 5–7).

#### 4.7 Yhteenveto häviöistä

Kuvassa 25 esitetään tekijät, jotka vaikuttavat häviöiden muodostumiseen. Sähkölevyn ja kestopagneettien materiaalien seoksella ja muotoilulla sekä valmistusmenetelmällä vaikuttaa häviöiden muodostumiseen



**Kuva 25.** Häviöiden muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä. (ABB Guide 2008: ).

Pyörrevirtoja vähennetään käyttämällä sähkölevyjen laminointia. Optimoimalla kestopagneettien sekä staattoriuran muotoilua voidaan rajoittaa rautahäviöitä. Taajuusmuuttajakäyttö vaatii tietyissä tapauksessa paksumman eristyksen käämityksessä, mikä hidastaa lämmönsiirtymistä. Paksumpi eriste aiheuttaa sen, että urassa olevaa kuparin määrää joudutaan pienentämään, jotta käämivyyhti mahtuu uraan. Tämä vastaavasti kasvattaa virrantiheyttä ja lämpenemää. Sähkökoneen mekaanisella rakenteella vaikutetaan välillisesti lämpötilaan. Esimerkiksi pääkotelo, erilliskotelot, laippakilpi tai ns. roiskesuoja heikentävät tuuletuksen virtausta ja jäähtymistä. Tuulettimen halkaisijaa pienentämällä tai lapaa kaventamalla voidaan parantaa hyötysuhdetta, mutta tämä heikentää jäähtymistä.

Käytännön laskennassa häviöille löytyy konekohtaiset painotuskertoimet. Nämä painotuskertoimet perustuvat kirjalliseen tai kokemukseräiseen tietoon.

Sähkökoneen toiminta on optimoitu tiettyihin toimintapisteisiin häviöiden perusteella. Sähkökonetta, jota ajetaan pienemmillä arvoilla optimoituihin toimintapisteisiin nähden on ylimitoitettu, jolloin koneesta ei saada maksimaalista hyötyä. Toisena ääripäänä on

sähkökoneen alimitoittaminen eli konetta ylikuormitetaan jatkuvasti, jolloin kone kuumenee ja eristys vanhenee nopeammin, jonka seurauksena käyttöikä lyhenee. Optimaalisesti mitoitettun sähkökoneen käyttöikä on noin 25–30 vuotta riippuen käyttötunneista. Sähkökoneen äänentaso on huomioitava käytännön konesuunnittelussa, koska asiakasvaatimuksissa on usein määritelty sallittu äänentaso. Vaikka ääni ei ole fyysinen häviö, niin toimenpiteet sen vähentämiseksi voivat välillisesti aiheuttaa häviöitä. Toisaalta sähkökoneen kuntoa voidaan arvioida äänentasosta – yllättävä äänentason kasvu voi olla merkki esim. alkavasta laakeririkosta.

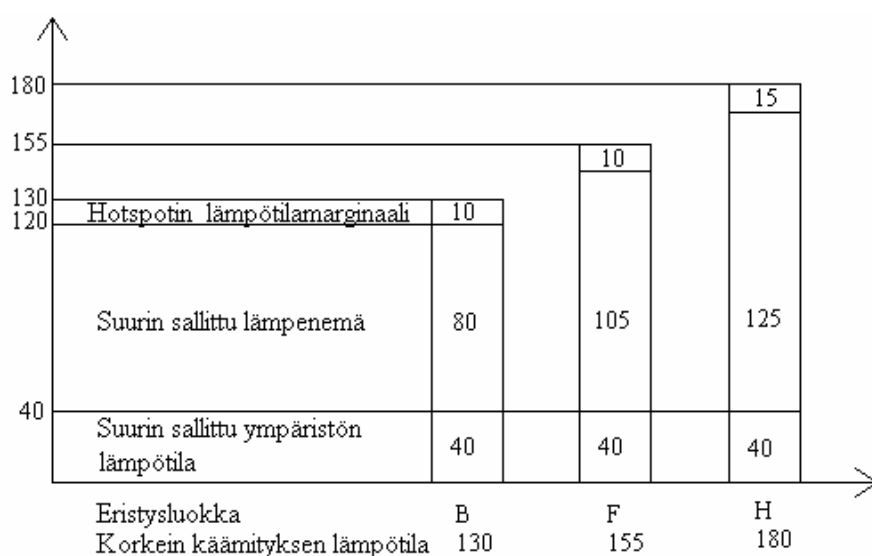
Häviöiden ymmärtäminen on tärkeää, jotta sähkökoneelle voidaan suunnitella optimaaliset toimintapisteet. Ympäristön lämpötilan tai ilmanpaineen kasvaessa voidaan koneeseen valita tehokkaampi jäähdytys tai optimoitu käämitys vastaamaan olosuhdevaatimuksia. (Motor Guide 2014: 45).

#### 4.8 Sähkökoneen lämpenemä

Lämpö ja sen vaikutus sähkökoneen toimintaan on ensijaisesti huomioitava suunnittelussa olipa konetyyppi mikä tahansa. Sähkökoneen lämpötila on verrannollinen syntyviin häviöihin. Häviöt voivat olla mekaanisia tai sähköisiä häviöitä, kuten edellisissä alaluvussa on kerrottu. Käytännön suunnittelussa sähkökoneen tuottamaa lämpötilaa arvoidaan laskentaohjelman ja koestustulosten perusteella huomioiden myös ympäristön lämpötila ja käyttökorkeus. Kestomagneettitahtigeneraattorissa lämpötilan laskennassa vaaditaan erityistä tarkuutta sekä kokemusperäisten painotuskertoimien huomioimista. Kuten aikaisemmin on jo todettu, niin odottamaton lämpötilan nousu voi aiheuttaa kestomagneettien demagnetoitumisen.

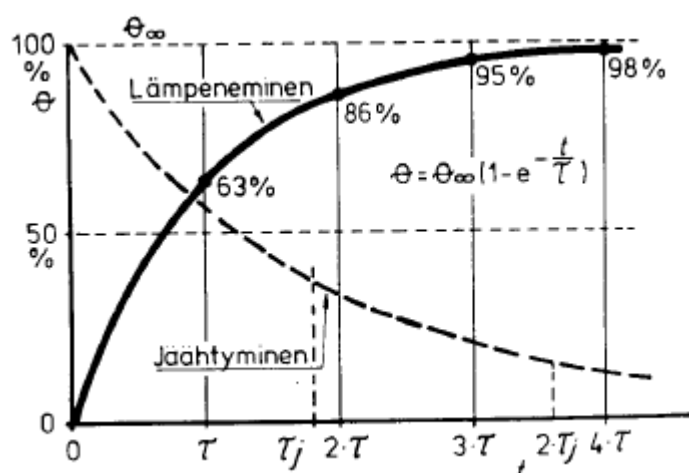
Yleisesti konesuunnittelussa käytetään termiä lämpenemä. Lämpenemä  $\Delta\theta$  kertoo miten paljon on lämpötilan muutos huomioimatta ympäristön lämpötilaa. Eristeluokat ja sallittu lämpenemä määritellään standardissa IEC60034-1: 2017. Sähkökonesuunnittelussa on yleisesti käytetyt B-, F- ja H-eristeluokat sekä niiden sallitut lämpenemät ympäristön läm-

pötilan ollessa +40 °C on esitelty kuvassa 26. Hotspot-piste on käämivyydin kuumin mitattu piste ja lämpötilamarginaalina on kymmenen astetta. Mikäli asiakas haluaa sähkökoneen lämpenemän olevan B-luokassa tällöin käämivyydin lämpötila on oltava alle +120 °C, ympäristön lämpötilan ollessa +40 °C, sallittu lämpenemä on 80 K. Jos ympäristön lämpötila on +55 °C tällöin sallittu lämpenemä B-luokassa on vain 65 K. Sähkökonevalmistajasta riippuen arvokilpeen leimataan eristeluokka ja lämpenemä.



**Kuva 26.** Eristeluokat ja sallitut lämpenemät (ABB Guide 2008: 49)

Käämivyyhdin lämpenemää  $\Delta\theta$  voidaan laskennallisesti tutkia lämpöaikavakion  $\tau$  avulla, joka kertoo miten nopeasti johtimen lämpenemä on saavuttanut 63 % loppuarvoon kuvassa 27.



**Kuva 27.** Jäähtymisen regressiosuorat (ABB 2006:6).

Lämpenemän laskennallinen arvo voidaan määrittää

$$\Delta\theta = \theta_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (32)$$

missä  $\theta_{\infty}$  on jatkuvuustilassa saavutettu loppulämpenemä, joka on likimain verrannollinen johtimessa kulkevan virran neliöön. Loppulämpenemä on saavutettu ajan  $t$  kuluessa. (ABB 2006:6, Aura 1996: 516).

Kaikille kestopagneettitahtikoneille tehdään tyhjäkäyntitesti ABB:lla Vaasan yksikössä. Testauksella varmistetaan koneiden toimivuus ja laatu. Kestopagneettitahtikoneilla tyhjäkäyntitestissä mitataan kestopagneettien tuottama indusoituva jännite. Mikäli mitattujen indusoituvien jännitteiden poikkema on enemmän kuin 0.3–1 prosenttia laskennallisesta arvosta niin tällöin voidaan olettaa, että roottorissa on jotain vikaa, esim. kestopagneetti on asennettu väärinpäin roottoriin. Kestopagneettien indusoima jännite on pyörimisnopeudesta riippuvainen.

Kestopagneettien lämpötila todennetaan tyhjäkäynnissä indusoituneen jännitteen perusteella, joka mitataan ennen ja jälkeen lämpenemäajan. Lämpenemäajossa konetta ajetaan nimellispisteessä kunnes sen lämpö taseantuu. Puhuttaessa mittauksista kylmänä ja kuumaa tarkoitetaan koneen tilaa ennen ja jälkeen lämpenemäajan. Kestopagneettien lämpötila  $T_{PM}$  lasketaan

$$T_{\text{PM}} = \frac{U_{\text{H}} - U_{\text{C}}}{\alpha U_{\text{C}}} + T_{\text{C}}, \quad (37)$$

missä kestopagneettien indusoima jännite on  $U_{\text{H}}$  kuumana ja kylmänä  $U_{\text{C}}$ .  $T_{\text{C}}$  on ympäristön ja magneettien lämpötila kylmänä ja  $\alpha$  kestopagneettien remanessivuontiheyden lämpötilakerroin, jonka kestopagneettien valmistaja ilmoittaa. Kestopagneettien lämpötila seuraa yleensä käänin keskimääräistä lämpötilaa. Demangetoituneiden kestopagneettien lämpötilaa ei voida selvittää indusoituvista jännitteistä, koska jännitteiden arvot poikkeavat huomattavasti toisistaan ja aiheutuvat laskennan vääristymää. (Hauru 2013: 43).

## 5 KESTOMAGNEETTITAHTIGENERAATTORIN SIMULOINNIT JA MITTAUKSET

Diplomityössä tutkittiin kestopagneettitahtigeneraattoria, joka valmistettiin ns. prototyypinä eräälle tuulivoimalavalmistajalle vuonna 2007 Vaasan moottoritehtaalla. Hi-taan radiaalivuokestopagneettitahtikoneen käyttöä laajennettiin nopeaan tuulivoimala-käyttöön. Tämä muodosti teknisiä ja tuotannollisia haasteista. Kestomagneettitahti-generaattoriprototyyppi päätettiin valmistaa koneesta, jonka runkokoko oli 400 ja napa-luku 12, tyyppimerkintä käytettiin M3BJ 400LB 12. Leimausarvot olivat arvokilvessä tähtikykentä, 700 V, 150 Hz, 950 kW, 830 A ja tehokerroin 0.95. Jäähdytystyypiksi va-littiin erillistuuletus.

Diplomityön tutkimus perustuu vuoden 2007 testituloksiin ja niiden analysointiin. Simu-loinnit ovat FCSmek-laskentaohjelmiston tuottamaa laskentatietoa kuluneelta vuodelta. Kestomagneettitahtigeneraattoriprotoa simuloitiin laskentaohjelmassa erilaisilla arvoilla, ensisijaisesti tavoitteena oli löytää laskentaohjelman tuottamat arvot, joiden avulla pys-tyttäisiin ennakoida kestopagneettien demagnetoitumista.

### 5.1 Laskentaohjelma

ABB Motors & Generatorsilla on oma suunnitteluohjelmistonsa, jota käytetään apuna konesuunnittelussa. Adept-ohjelmisto on käyttöliittymänä huomattavaan määrään erilai-sia aliohjelmiä. Adeptin aliohjelmat käyttävät laskennassa hyväkseen tietokantoja, jossa on määriteltynä erikseen jokaisen konetyypin parametrit. FCSmek- ohjelmisto on Adep-tissa toimiva aliohjelmisto. Sen laskenta perustuu elementtimenetelmään (Finite Element Method, FEM), joka käyttää laskennassa apuna numeerista iteraatiota. Laskentamalli, joka halutaan ratkaista, jaetaan useiksi pieniksi geometrisiksi osiksi. Laskenta voi tapah-tua käyttämällä kaksi- tai kolmiulotteista geometriaa. Kolmiulotteinen geometria antaa tarkemman simulointituloksen, mutta vaatii enemmän järjestelmältä laskentakapasiteet-tia. (Talvitie 2005: 20–24).

Kestomagneettitahtigeneraattorin FEM-simuloinnissa käytetään aikaharmonista tai aika-askel-menetelmää. Aikaharmoninen laskentamenetelmä perustuu oletukseen sinimuotoisesta aikariippuvuudesta, mikä ei käytännössä toteudu, koska raudan magnetointikäyrä on korvattu ns. keskiarvoistetulla magnetointikäyrällä. Aika-askel-menetelmä on laskennassa tarkempi, mutta toisaalta hitaampi. Aika-askel-menetelmässä voidaan hyödyntää käyttämällä jälkiratkaisijaa, josta voidaan visuaalisesti tarkastella mm. vuon kulkureittejä sekä vuon- ja virrantiheyksiä ja häviöitä. Simulointien tulokset voivat hieman poiketa toisistaan riippuen laskentaprofiilista ja sen asetuksista. (Hauru 2013: 21–28).

## 5.2 Kestomagneettitahtigeneraattorin simuloinnit

Simuloinnissa keskityttiin tiettyihin kestomagneettien ominaisuuksien, kuten vuontiheyden ja häviötiheyden, analysointiin eri tehoilla ja taajuuksilla. Lisäksi tutkittiin häviöjakaumaa, jossa FCSmek-ohjelma antoi tulosteena hankaus-, rauta-, staattori-, roottori- ja kokonaishäviöt. Tutkittava tehoalue oli 250–950 kW, 100 kW:n välein ja taajuusalueena oli 50–200 Hz, 25Hz:n askelin. Syöttöjännite määritettiin taajuuksien suhteessa. Simuloinnin tuloksia arvioitiin muokkaamattoman tiedon perusteella, esim. häviöissä ei käytetty painotuskertoimia. FCSmek-tulosteissa näkyvät arvot on kuvassa 28.

Kestomagneettitahtigeneraattorin suoritusarvoja ei analysoitu eri ajopisteissä, koska työ rajattiin koskemaan vain syntyviä häviöitä.

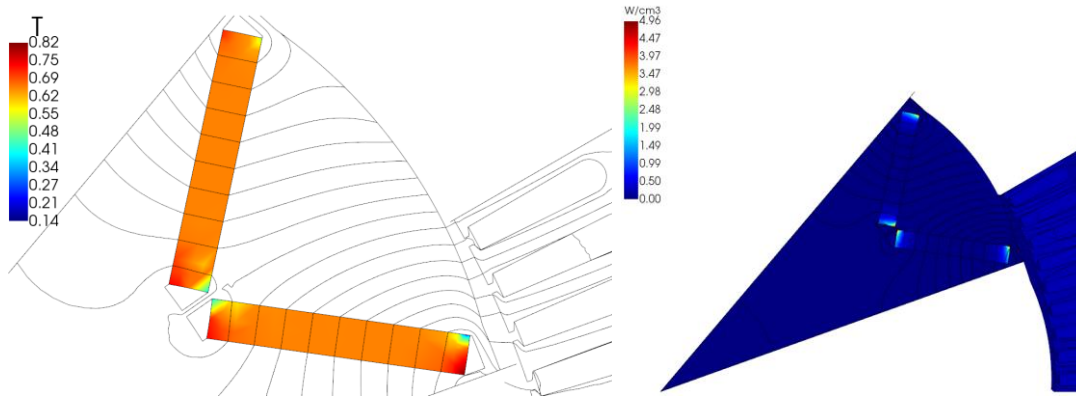
M3BJ 400LB 12		Base program: Fcsmek-cimtd		08.10.2018 - 12:19:32	
OUTPUT (elec):	924.956 kW	LOAD(%)	EFF(%)	CURRENT (A)	cosf
INPUT:	945.091 kW	100 :	97.87	850.90	0.9881 ind
VOLTAGE:	641.5 V	75 :	0.00	0.00	0.0000
FREQUENCY:	150.00 Hz	50 :	0.00	0.00	0.0000
CONNECTION:	Star	25 :	0.00	0.00	0.0000
CURRENT:	850.90 A	125 :	0.00	0.00	0.0000
COSFI:	0.9881 ind	0 :		0.00	0.0000
TORQUE:	-6016.64 Nm	start:		0.00	0.0000
SPEED:	1500.00 rpm				
POLES:	12				
LOSSES			TORQUE (Nm)	SPEED (rpm)	DELTA (deg)
Friction	2029.0 W	Tn	-6016.64	1500.00	-35.444
Iron	9184.3 W	Tmax	0.00	0.00	0.000
Stator	5218.3 W	Tmin	0.00	0.00	0.000
Rotor	3704.2 W	Ts	0.00		
Total	20135.9 W	STARTING			
		Ts/Tn	-0.00		
		Tmin/Tn	-0.00	TRUN1:	100.0 K
H_NUMBER	85862	Tmax/Tn	-0.00	TRUN2:	100.0 K
CALCID	LKH85862	Is/In	0.00	Amb:	20.0 C
FLUX DENSITY [T]					
		Bys1	1.216	Bts4	1.724
		Byr1	0.000	Bts3	1.714
		Byr2	0.000	Bts2	1.733
		Bd	0.898	Bts1	1.057
		Btr1	0.000	Btr2	0.000
		Btr3	0.000	Btr4	0.000
Br	0.9790 T	Hc	-738700 A/m	Mass of PM	98.96 kg
				Bmin	0.413 T

200 steps/period, 4 periods. Supply: simple 2-level DTC. fsw = 2250.000 Hz

### Kuva 28. FCSmek-tuloste simulointituloksista.

FCSmekin simuloimat häviöt on jaoteltu komponenttitasolla. Staattorihäviöt koostuvat pelkästään käämin resistiivistä häviöistä. Roottorihäviöt sisältävät resistiiviset häviöt roottorissa, johon kuuluvat myös kestopagneeteissa syntyvät häviöt. Rautahäviöiksi lasketaan sekä staattori- että roottorilevyissä syntyvät häviöt. Tulosteessa näkyy myös kestopagneettien remanessivuontiheyden ja koerstiivikentän arvo. Bmin-arvo on kestopagneettien kahden jakson keskiarvoistettu minimivuontiheys. Jälkiratkaisija antaa kestopagneettien vuontiheyden minimiarvon viimeisellä laskentahetkellä. Simulointituloksissa keskityttiin jälkiratkaisijan laskemiin häviö- ja vuontiheyden arvoihin. Jälkiratkaisijan avulla pystytään visuaalisesti osoittamaan myös kestopagneeteissa matalimman ja korkeimman häviö- ja vuontiheyden sijainti.

Kuvasta 29 voidaan havaita, että matalin vuontiheys löytyy kestomagneettien päädyistä, mistä yleensä alkaa myös kestomagneettien demagnetoituminen, koska ne ovat eniten alttiina kannaksissa ja staattorin hampaissa syntyville pyörrevirtahäviöille.

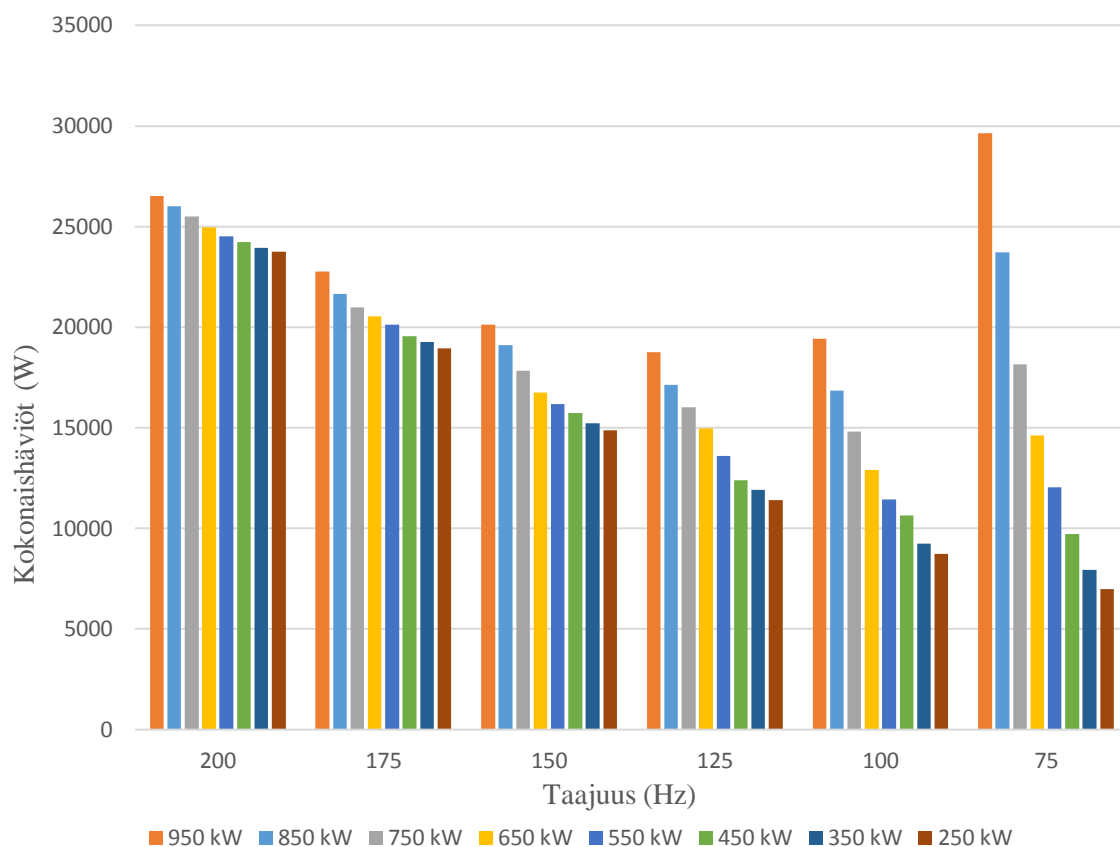


**Kuva 29.** Jälkiratkaisijan esittämä vuon- ja häviötiheys.

Simulointituloksia tutkittaessa on muistettava, että kyseinen käämi oli optimoitu toimimaan 150 Hz:n eli 1500 rpm kierrosnopeudessa ja 950 kW:n kuormalla, joten pienillä taajuuksilla ja tehoilla tapahtuva kyllästymisilmiö aiheuttaa laskentatuloksissa epäjohdonmukaisuuksia ja laskentavirhettä. Tämän vuoksi osaa simulointituloksia ei ole esitetty epärealistisissa ajopisteissa. Hankaushäviöt ovat taajuudesta riippuvaisia ja FCSmek-ohjelmisto laskee hankaushäviöt yhtäsuuriksi identtisillä taajuuksilla, joten hankaushäviöitä ei eritellä tarkemmin simuloinneissa, vaikka niiden arvo huomioidaan kokonaishäviöissä. Liitteessä 1 esitetään simulointitulokset.

### 5.2.1 Kokonaishäviöt eri taajuuksilla ja tehoilla

Häviöt ovat riippuvaisia kuorman suuruudesta. Kuvassa 30 esitetään kestomagneetti-generaattorissa muodostuvia kokonaishäviöitä eri tehoilla ja taajuuksilla. Tuloksista huomataan, että tehon ja taajuuden pienentyessä häviöt pienenevät lineaarisesti kunnes alkavat taas tietyillä taajuuksilla kasvamaan.



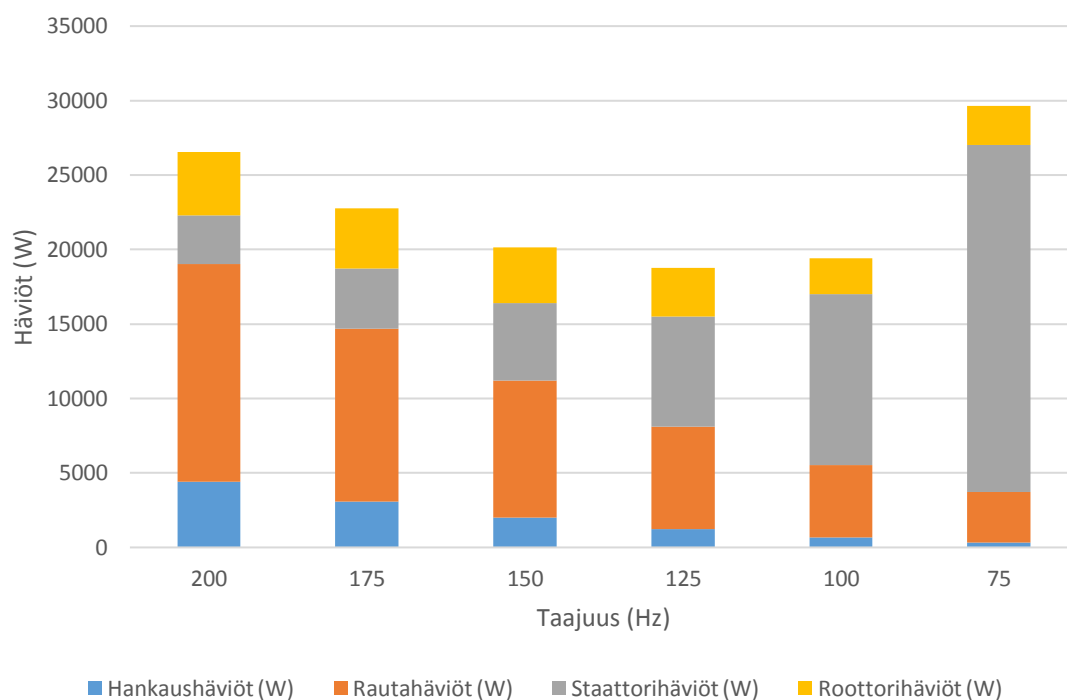
**Kuva 30.** Kokonaishäviöiden jakauma eri taajuuksille ja tehoille

Tutkittaessa 950 kW:n kuormaa eri taajuuksilla huomataan muutoksia kokonaistehohäviöissä: 200 Hz:n taajudella kokonaistehohäviöt pienenevät lineaarisesti, kunnes 100 Hz:n taajuudella kokonaishäviöt alkavat kasvamaan, 75 Hz:n taajuudella kokonaishäviöt nousevat jo lähemmäs 30 kW:a, mikä kertoo, että generaattori ei ole optimaalinen toimimaan kyseissä toimintapisteissä kyllästymisen vuoksi. Sama ilmiö toistuu 550 kW:iin saakka, kokonaishäviöt alkavat kasvamaan pienillä taajuuksilla.

Laskennalliset kokonaishäviöt ovat noin 20 kW:a tutkittavassa 950 kW:n ja 150 Hz:n ajopisteessä.

### 5.2.2 Tehohäviöiden jakauma eri taajuuksilla

Simuloinnissa tutkittiin miten eri tyyppiset häviöt jakaantuivat 950 kW:n kuormalla eri taajuuksien suhteen. Kuvasta 31 huomataan 200 Hz:n taajuudella esiintyvät korkeimmat



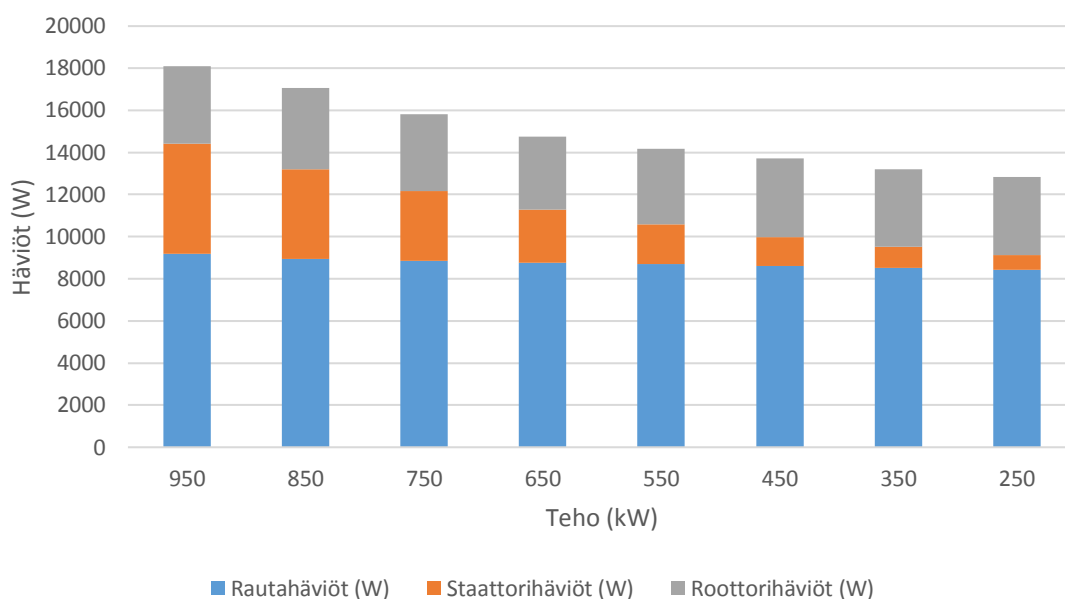
**Kuva 31.** Tehohäviöt taajuuden funktiona 950 kW:ssa.

rautahäviöt, mutta niiden määrä vähenee taajuuden pienentyessä, vastaavasti staattorihäviöiden määrä kasvaa. 125 Hz:n taajuudella rautahäviöt ja staattorihäviöt ovat lähinnä toisiaan, jolloin kokonaishäviöt (hankaushäviöt, rauta-, staattori-, ja roottorihäviöt) ovat minimissään. 125 Hz:stä pienemmillä taajuuksilla staattorihäviöt alkavat merkittävästi kasvamään rautahäviöiden vähentyessä. 50 Hz:in taajuudella simulointitulokset ovat samassa linjassa, mutta ne eivät ole järkeviä tuloksia raudan kyllästymisen vuoksi ja koneen toiminnan kannalta ja siksi niitä ei esitetä.

Hankaushäviöt ovat verrannollisia taajuuteen silloin kun kyseessä on itsetuulettuva kone. Tässä simuloinnissa hankaushäviöt vähenevät 6,5-kertaisesti taajuuden puolittuessa. Adept-käyttöliittymässä hankaushäviöt voidaan määrittellä käämikohtaisesti, kun tiedetään jäähdytysmenetelmä.

### 5.2.3 Tehohäviöiden jakauma eri tehoilla

Simuloinnissa tutkittiin häviöjakaumaa 150 Hz:n taajuudella tehojen funktiona. Kuvasta 32 nähdään, että taajuuden ollessa vakio ja tehon pienentyessä staattorihäviöt vähentyvät,



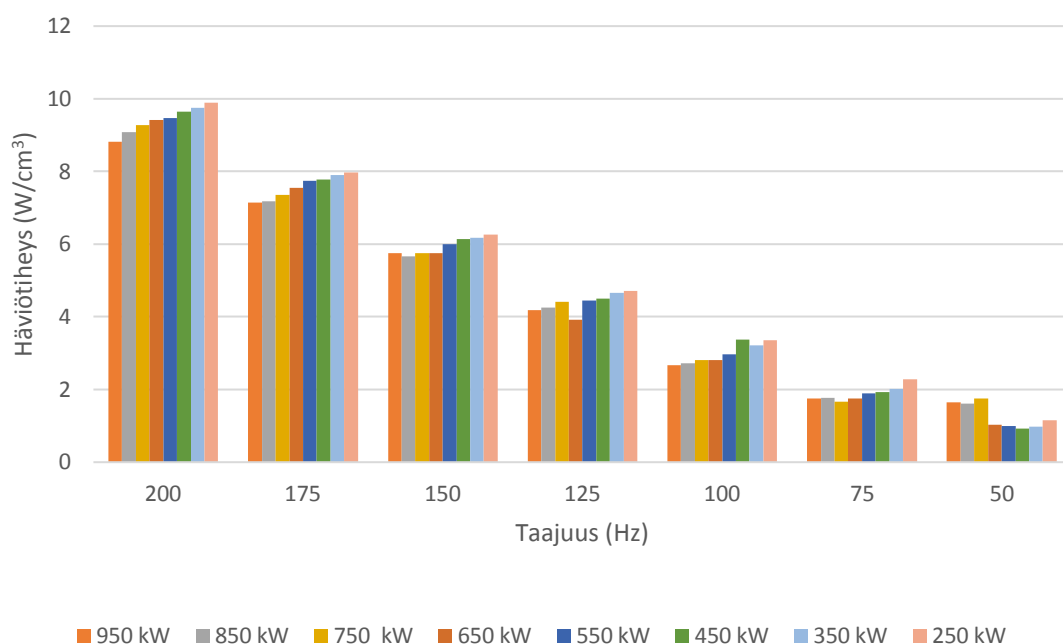
**Kuva 32.** Häviöiden jakauma tehon funktiona 150 Hz:ssä.

mutta rauta- ja roottorihäviöt pysyvät samalla tasolla. Kokonaishäviöiden pienentyminen perustuu pääasiallisesti staattorihäviöiden vähenemiseen. Tästä voidaan päätellä, että tehon pienentyminen ei vaikuta merkittävästi rautahäviöiden määrään. Huomattavaa on, että roottorihäviöt alkavat kasvamaan 650 kW pienemmillä tehoilla. Hankaushäviöitä ei ole huomioitu tässä simuloinnissa. Kuvan 32 perusteella todetaan, että taajuuden merkitystä ei saa väheksyä häviöiden ja lämpenemän muodostumisessa.

Rautahäviöiden merkitys korostuu erityisesti korkeilla taajuuksilla, mikä on huomioitava käytännön konesuunnittelussa, etenkin silloin kun laskenta perustuu pienemmällä taajuudella testatun koneen mittaustuloksiin. (Hauru 2013: 36).

#### 5.2.4 Kestomagneettien häviötiheyksien simulointi

Kestomagneettien häviötiheyksiä simulointiin eri tehoilla taajuuden funktiona. Häviötiheys ilmoitetaan  $W/cm^3$ . Kuten aikaisemmin jo todettiin mitä resistiivisempi kestopagneetti on, sen paremmin se ehkäisee pyörrevirtojen syntymistä. Kuvasta 33 havaitaan myös häviötiheydet ovat

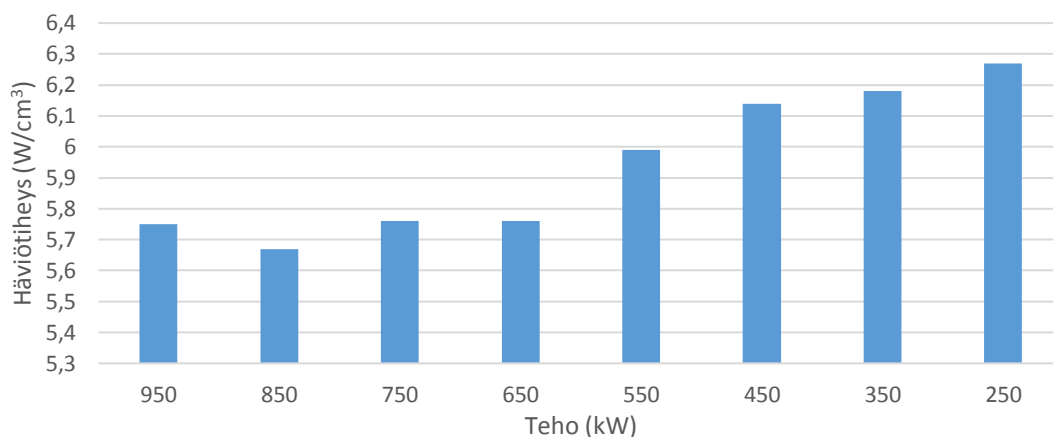


**Kuva 33.** Kestomagneettien häviötiheydet taajuuden funktiona.

taajuudesta riippuvaisia, mitä suurempi on taajuus sitä isompi on häviötiheys. Taajuuden pysyessä vakiona ja tehon pienentyessä huomataan, että häviötiheys alkaa kasvamaan.

Tähän syynä on magneettivuon tiheyden muutos, jonka seurauksena tapahtuu kyllästy-misilmiö kestopagneeteissa. Kuvasta 33 huomioidaan, että isommilla taajuuksilla kuin 125 Hz:ä, häviötiheyden arvo kasvaa yli neljä  $\text{W}/\text{cm}^3$  tehosta riippumatta. Tätä arvoa pidetään eräänlaisena empiiriseen kokemukseen perustuvana riskiraja-arvona kestopagneetin degmagnetisoitumisessa.

Kuvassa 34 on simuloitu häviötiheyksiä eri tehoilla ja taajuuden ollessa 150 Hz. Tehon ollessa 950 kW häviötiheys on  $5,75 \text{ W}/\text{cm}^3$ . Häviötiheyden arvo pienenee edelleen 850 kW:ssa, mutta alkaa tämän jälkeen kasvamaan melkein lineaarisesti. Tehon vähentyessä kyllästyminen sekä napakulman pienentyminen kasvattavat häviötiheyden arvoja.



**Kuva 34.** Häviötiheyksien vertailua eri tehopisteissä 150 Hz:n taajuudessa.

### 5.3 Kestomagneettitahtigeneraattorin testaaminen

Kestomagneettitahtigeneraattoria ajettiin taajuusmuuttajan kautta, joten mittaustulokset saatiin erikseen taajuusmuuttajalle ja generaattorille. Testitulokset esitetään mittauspöytäkirjassa, liitteessä 2 ja 3. Mittaustulokset on ilmoitettu erikseen generaattorille ja taajuusmuuttajalle tehohäviöinä ja lämpötiloina. Tehohäviöitä ei erotella testituloksissa yksityiskohtaisesti.

Kestomagneettitahtigeneraattori testataan lämpenemääjossa, jossa resistanssimenetelmällä mitataan lämpenemää. Hyötysuhde määritetään ulostulevan ja sisäänmenevän tehon, ns. Output/Input -suhteena.

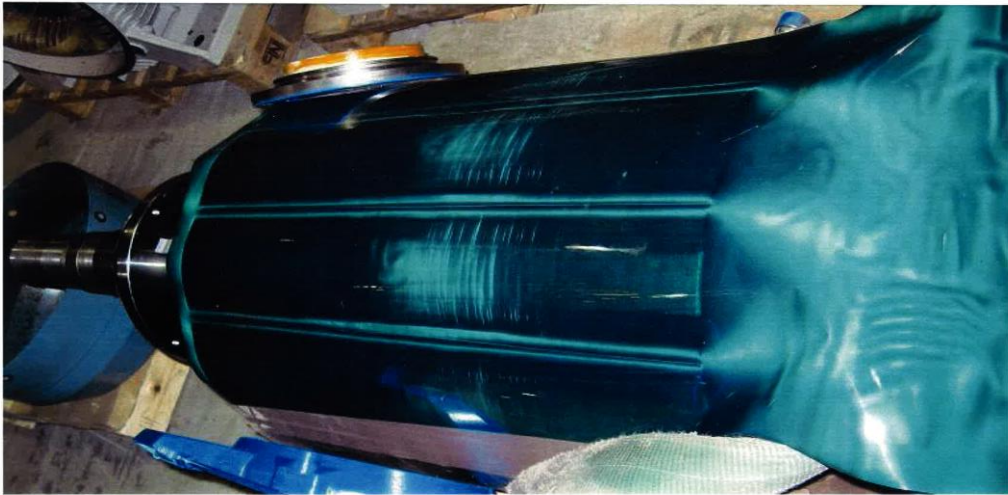
Liitteessä 2 löytyy kestomagneettigeneraattorin ensimmäisen koestuksen mittaustulokset. Lämpenemääjo aloitettiin nimellispisteestä 700 VY, 150 Hz, 950 kW, jossa taajuusmuuttajaan syötettävä virta-arvo oli 830 A ja tehokerroin 0,95. Nämä arvot ovat taajuusmuuttajan ”näkemisiä arvoja”. Todellisessa käytössä prototyypin ottama virta oli 863 A ja tehokerroin 0,85. Kolmen tunnin ajon aikana samassa mittauspisteessä generaattorin ottama virta kasvoi 53 A ja tehokerroin romahti arvosta 0,85 arvoon 0,80. Näiden seurauksena

myös hyötysuhde heikkeni. Tehoa alennettaessa sama ilmiö toistui virran ja tehokertoimen mittaustuloksissa. Viimeisessä mittauksessa, 810 kW:n ajopisteessä mittattiin vyyhdinpään lämpenemäksi 93,5 K resistanssimittauksella, mutta roottorin lämpötilasta ei ollut mittaustuloksia. Mittausantureilla mitattuna käämivyyhdin lämpötila on ollut korkeimmillaan noin 140 °C 950 kW:n ajopisteessä.

Liitteessä 3 löytyy proton mittaustulokset uudelleen koestuksesta. Toisessa ajossa generaattoria ajetaan aluksi 850 kW teholla ja huomataan heti virran kasvu sekä tehokertoimen romahtaminen. Tämän jälkeen generaattorin kuormituspistettä alennetaan useampaan otteeseen. Generaattoria ajetaan noin 400 kW:n kuormalla useampi tunti, mikä kertoo roottorin lopullisen tilanteen. Tässäkin ajopisteessä generaattorin virta kasvaa noin 50 Ampeeria. Lisäksi tehokerroin ja hyötysuhde romahtavat. Tämä kertoo, että koneen roottorissa olevat kestopagneetit ovat pysyvästi demagnetoituneet. Koneen viimeisessä mittauksessa vyyhdinpään lämpenemä on ollut 86,6 K ja roottorin lämpenemä 120,3 K.

Roottorin lämpenemä voidaan arvoida häviöiden suhteesta. Hyödynnetään 400 kW:n ajopisteestä saatua mittaustulosta roottorin lämpenemästä (120 K) sekä kokonaishäviöitä (46,2 kW). Tätä mittaustulosta verrataan muiden ajopisteiden mittattuihin tehohäviöihin. Mittaustuloksista huomataan, että korkein tehohäviölukema on ollut 59,8 kW, 950 kW:n ajopisteessä ensimmäisessä koeajossa. Tehohäviöiden perusteella voidaan laskea, että 950 kW:n ajopisteessä roottorin arvoitu lämpenemä oli noin 155 K. Roottorin lämpenemään lisättäessä ympäristön lämpötila 22 °C saadaan roottorin lopulliseksi lämpötilaksi 177 °C. Roottorissa sijaitsevilla kestopagneeteilla oletetaan olevan sama lämpötila kuin roottorilla.

Kuvassa 35 on demagnetoituneesta roottorista kuva. Muovisen erikoiskalvon avulla voidaan osoittaa tarkasti kohdat, jossa demagnetoituminen on tapahtunut. Pääasiallinen demagnetoituminen on tapahtunut roottorin keskellä jossa jäähtytys on heikointa. Sähkökoneen pääasiallinen jäähtyminen tapahtuu akselin ja ilmavälin kautta. Lisäksi jäähtymistä tapahtuu myös rungon, laakerikilpien, laakereiden ja liitäntäalustan kautta. Kuva 35 osoittaa, että keskellä olevat magneetit ovat olleet huomattavasti kuumemmissa olosuhteissa kuin laakereiden lähellä olevat magneetit.



**Kuva 35.** Demagnetoitunut roottori.

## 6 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Demagnetoituneen kestopagneettitahtigeneraattorin tapauksessa käytännön mittaustulokset osoittivat, että tekninen ratkaisu ei ollut toimiva nopeassa käytössä. Tehohäviöt ja niiden aiheuttama lämpötilan nousu aiheuttivat kestopagneettien demagnetisoitumisen roottorissa.

Tulosten analysoinnin kannalta on tärkeää selvittää demagnetoituneen roottorin ja kestopagneettien lämpötila. Kestopagneettien BH-käyrä kertoo, minkälaisen vuontiheyden kestopagneetti luo tietyssä lämpötilassa. Tutkimuksen kohteena olevassa kestopagneettitahtigeneraattorissa on käytetty Neorem 495a-tyyppistä kestopagneettimateriaalia. Tämän materiaalin BH-käyrä on esitetty myös luvun 3 kuvassa 15. Jälkiratkaisija ilmoitti kestopagneetin magneettivuon tiheyden laskennalliseksi minimiarvoksi 0,136 T kun taas FCSmek-tulosteessa arvo oli 0,413 T, 950 kW- ja 150 Hz -ajopisteessä. Kuvan 15 BH-käyrästä voidaan huomata, että vuontiheyden ollessa 0,413 T ei ole riskiä demagnetoimisesta, vaikka roottorissa oleva lämpötila olisi 180 °C. Vuontiheyden ollessa 0,136 T ja magneettien lämpötilan ollessa lähempänä 180 °C toimintapiste on BH-käyrän alapuolella ja tarkoittaa pysyvää demagnetoitumista. Testitulosten perusteella roottorin lämpötilan arvoitiin olevan hyvin lähellä 180 °C. Lisäksi kestopagneettien häviötiheys oli yllin riskirajan.

Kestopagneettigeneraattorin testitulosten perusteella kokonaishäviöt olivat generaattorissa noin 25 kW:n luokkaa tutkittavalla teho-taajuus yhdistelmällä. Taajuusmuuttajan ja generaattorin yhteishäviöt olivat noin 58 kW:n luokkaa. Laskennallinen kokonaishäviöteho generaattorilla oli noin 20 kW. Ylläoleviin tietoihin perustuen tämäntyyppisessä kestopagneettitahtigeneraattorissa kokonaishäviöt eivät saisi olla ainakaan yli 20 kW ilmajäähdytteisellä generaattorilla, jotta häviöiden aiheuttama lämpenemä ei aiheuttaisi kestopagneettien demagnetoitumista.

Häviöiden simulointituloksista huomattiin seuraavat asiat:

1. Rauta- ja roottorihäviöiden määrään ei vaikuta tehon alentaminen.

2. Rauta- ja roottorihäviöt ovat riippuvaisia taajuudesta.
3. Staattorihäviöt ovat riippuvaisia kuormasta.
4. Staattori- ja rautahäviöiden välinen suhde on oltava mahdollisemman pieni, jolloin kokonaishäviöt ovat alhaisimmillaan.
5. Häviötiheys on riippuvainen taajuudesta, mutta kyllästymisilmiö kasvat-  
taa sitä.

Tutkimustyötä aloitettaessa oli lähtökohtana, että korkean taajuuden synnyttämät rautahäviöt olivat syynä kestomagneettien demagnetisoitumiseen roottorissa. Laskennalliset tulokset osoittivat, että rautahäviöiden minimoimiseen ei vaikuta kuormituksen alentaminen vaan merkittävänä tekijä on taajuuden pienentäminen. Sama asia todennettiin myös häviötiheyden arvoissa; mitä korkeampi taajuus sitä isompi on häviötiheys. Lisäksi kestomagneettien kyllästymisilmiö todennettiin laskennallisesti, kun kyseessä on korkea taajuus – pieni teho -yhdistelmä. Eli laskennalliset simuloinnit osoittivat korkean taajuuden aiheuttavan kestomagneettien demagnetisoitumisen. Toisaalta asiantuntija arveli kestomagneettien demagnetoituneen enemmänkin taajuusmuuttajan tuottamien yliaaltojen vuoksi. Staattorin käämissä etenevä ei-sinimuotoinen jänniteaalto indusoi yliaaltoja myös roottoriin ja täten kasvattaa häviöitä sähkölevyissä. Taajuusmuuttajakäyttö ja korkea taajuus ovat yhdessä demagnetoitumisen riskitekijöinä kestomagneettitahtikoneessa.

Kestomagneettitahtigeneraattori, joka loppujen lopuksi toimitettiin asiakkaalle oli vesijäähdytteinen kestomagneettitahtigeneraattori, jonka sähköinen rakenne oli identtinen demagnetoituneen generaattori kanssa. Mekaaninen rakenne päivitettiin nestejäähdytteiseksi ja kuormituspiste muutettiin. Tehoa pienennettiin, kytkentä muutettiin sekä pyörimisnopeutta kasvatettiin, eli leimatut arvot olivat: kolmiokytkentä 500 V, 200 Hz ja 500 kW. Asiantuntijan kommenttien mukaan kestomagneettitahtigeneraattorin tähtikytkennässä magneetteihin indusoituu enemmän pyörrevirtoja kuin kolmiokytkennässä, mikäli roottorin ja staattorin välinen muuntosuhde on epäedullinen. Uudelleenleimauksessa syöttöjännitteeksi valittiin 500 V, jotta magneettivuo olisi pienempi. Pienempi kuormitus

ja sen vaikutus napakulmaan muuttavat myös toimintapistettä BH-käyrällä eli toimitaan palautuvan polarisaation alueella.

Kestomagneettitahtikoneen jäähdytystapa vaihdettiin erillistuulettusta rakenteesta vesi-jäähdytteiseen rakenteeseen, jonka on todettu olevan tehokkain jäähdytystapa. Näin asiakkaalle pystyttiin toimittamaan edelleen korkealla taajuudella toimiva radiaalivuotyypinen kestopagneettitahtigeneraattori, vaikka simulointitulokset (liite 1) uudelleenleima-  
tuilla arvoilla osoittivat tehohäviöiden olevan edelleen isot, noin 21 kW:a. Nestejäähdytys viilentää kuitenkin tehokkaammin roottorin keskellä sijaitsevien kestopagneettien lämpötilan nousua ja täten pystytään paremmin hillitsemään lämpötilan kasvua kestopagneeteissa.

Uudentyyppistä sähkökonetta suunniteltaessa joudutaan välillä ottamaan riskejä teknisissä ratkaisuisissa. Vaikka laskentaohjelmat ovat kehittyneet vuosien saatossa niin luotettavaa mittaustietoa antavat vain koestustulokset, jotka kertovat todelliset sähkökoneen toiminta-arvot. Mitä enemmän on mittaustuloksia samasta tyyppistä sen paremmin sähkökonetta pystytään mallintamaan. Joskus mittaustuloksia ei ole saatavilla ja konesuunnittelu on tehtävä simulointien ja kokemusperäisen tiedon perusteella. Kestomagneettitahtikoneen suunnittelussa on ymmärrettävä kestopagneettimateriaaliominaisuudet sekä niiden käyttäytymistä BH-käyrällä eri vuontiheyksillä sekä lämpötiloissa. Kestomagneettien korkea häviötiheyden arvo yksistään ei aiheuta demagnetisaatiota, mutta se toimii varoitavana merkinä kestopagneetin demagnetisoitumisriskistä.

Sähkökonesuunnittelu on usein teknisten ratkaisujen kompromissi, jossa hinta on käytännössä ratkaisevin tekijä. Asiakkaan tavoite on saada mahdollisemman paljon vääntömomenttia mahdollisemman pienellä investoinnilla. Edistykselliset asiakkaat ymmärtävät häviöiden ja niiden minimoinnin merkityksen konesuunnittelussa. Kestomagneettimateriaali kasvattaa kestopagneettikoneen hankintahintaa vaativissa sovelluksissa, mutta häviöiden vähentyminen vaikuttaa pidemmällä ajalla myös käyttökustannuksiin pienentymiseen.

## LÄHDELUETTELO

- ABB, (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*, 9. painos. Vaasa. 626 s. ISBN 951-99366-0-2.
- ABB, (2014). *Motor guide*. 3. painos. Vaasa. 126 s. ISBN 952-91-0728-5.
- Gieras, Jacek F., Mitchell Wing (2002). *Permanent Magnet Motor Technology Design and applications*. Second Edition, Revised and Expanded. New York: Marcel Dekker, Inc. 590 s. ISBN 0-8247-0739-7.
- Haavisto, Minna (2013). *Studies on the time-dependent demagnetization of sintered NdFeB permanent magnets*. Tampere: Tampere University of Technology University. 113 s. Väitöskirja. ISBN 978-952-15-3196-5.
- Harnefors, L. (2002) *Control of variable-speed drives*. Luentomoniste. Västerås: Mälardalenin yliopisto.
- Hauru, Alpo. (2013) *Kestomagneettikone M3BJ, suunnittelu*. Ei julkaistu. Vaasa: ABB Motors and Generators Vaasa. 44 s.
- Heikkilä, Tanja (2005). *Permanent Magnetic Synchronous Motor for Industrial Inverter Applications – Analysis and Design*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 109 s. Väitöskirja. ISBN 951-764-699-2.
- International Electrotechnical Commission (2014). IEC 60034-2-1 *Rotating Electrical Machines - Part 30-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles)*. 190 s.

International Electrotechnical Commission (1996). IEC 60034-2 *Rotating Electrical Machines - Part 30-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles)*. 190 s.

International Electrotechnical Commission (2014). IEC 60034-30-1. *Rotating Electrical Machines - Part 30-1: Efficiency Classes of line operated AC motors (IE-code)*. 54 s.

International Electrotechnical Commission (2017). IEC 60034-1. *Rotating Electrical Machines - Part 1: Rating and performance*. 70 s.

International Electrotechnical Commission (2009). IEC/TR 62518. *Technical report: Rare earth sintered magnets - Stability of magnetic properties at elevated temperatures (Excluding Machines for Traction Vehicles)*. 32 s. ISBN 978-2-88910-753-7.

Jokinen, Tapani (1980). *Sähkökoneen synnyttämä melu*. 97 s. Espoo: TKK Offset. ISBN 951-751-857-9.

Korpinen, Leena, Marko Mikkola, Tommi Keikko & Emil Falck (2008). *Yliaalto-opus*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 15.9.2018]. Saatavana <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>

Korpinen, Leena (2000). *Yliaalto-opus*. Sähkövoimatekniikka - virtuaalikurssille. Luentomoniste. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 176 s. ISBN 952-15-0463-3.

Kolehmainen, Jere (2011). *Dovetail rotor poles in synchronous permanent magnet and reluctance machines*. Helsinki: Aalto University. 132 s. Väitöskirja. ISBN 978-952-60-4194-0.

Kolehmainen, Jere (2012). *SATE2050 Pyörivät sähkökoneet*. Luentomoniste. Vaasan yliopisto. Sähkötekniikka. Luentomateriaali.

- Krings, Andreas (2014). *Iron losses in electrical machines – Influence of material properties, manufacturing processes and inverter operation*. [Verkkodokumentti]. Tukholma: KTH School of Electrical Engineering. 165 s. Väitöskirja. ISBN 978-91-7595-099-0. Saatavana <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:717326/FULLTEXT01.pdf>
- Lateb, Ramdane, Nourreddine Takorabet & Farid Meibody-Tabar (2006). *Effect of magnet segmentation on the cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors*. IEEE Transactions on magnetics 42:3; 442–445.
- Neorem, (2019). [Verkkodokumentti]. Saatavana <http://www.neorem.fi/files/neorem/product-PDF/permanent%20magnets/495a.pdf>
- Nurmi Timo, Mikko Vähätalo & Riikka Saarimaa (2011). *Magneettiteknologiaklusteri 2020*. Turun yliopisto. 62 s. Tutkimus. ISBN 978-952-249-127-5. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 15.9.2018]. <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID869.pdf>
- Pyrhönen Juha, Pia Salminen, Asko Parviainen & Markku Niemelä (2005). *Kestomagneettitahtikoneiden suunnittelukurssi*. Opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto.
- Pyrhönen, J. (2005) *Pyörivän sähkökoneen suunnitleminen*. Luentomateriaali. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto.
- Pyrhönen, J. (2005) *Sähkökäytöt 2005...2006*. Luentomateriaali. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto.

- Pyrhönen Juha, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovcová (2014). *Design of Rotating Electrical Machines*. First edition. Wiley. ISBN 978-0-470-69516-6.
- Ruoho, Sami (2011). *Modeling demagnetization of sintered NdFeB magnet material in time-discretized finite element analysis*. Helsinki: Aalto University. 174 s. Väitöskirja. ISBN 978-952-60-4000-4.
- Ruoho, Sami (2007). *Demagnetisation of permanent magnets in electrical machines*. Teknillinen korkeakoulu. Doctoral school of energy- and geo-technology Jan 15–20. 2007. Kuressaare, Estonia. Saatavana [https://www.researchgate.net/publication/268422346\\_Demagnetisation\\_of\\_Permanent\\_Magnets\\_in\\_Electrical\\_Machines](https://www.researchgate.net/publication/268422346_Demagnetisation_of_Permanent_Magnets_in_Electrical_Machines)
- Talvitie, Topi (2005). *FEM-ohjelmiston sopeuttaminen ja hyväksikäyttö nopeaan kestoplaneettimoottorisuunnitteluun*. 88 s. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto.
- Tuusa, Heikki, Tapani Nurmi & Tero Viitanen (2004). *Sähkömoottorit*. Opetusmoniste. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, tehoelektroniikan laitos. 161 s.
- Trout, S.R., Wooten, G.D. (2003). *Selection and specification of permanent magnet materials*. Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480), ISBN: 0-7803-7935-7. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1247855/>
- Vesala, Jaakko (2011). *Suurnopeusmoottorin kolmiulotteinen sähkömagneettinen mallintaminen*. 88 s. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma.

Viertokoski, Eero (2011). *Murtovakokäämityksen soveltaminen hitaissa korkean hyötysuhteen sähkökoneissa*. 74 s. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Automaatiotekniikan koulutusohjelma.

## Liite 1. Prototyypin simulointitulokset

Jännite	Teho (kW)	Taajuus (Hz)	Magneettien häviöteho (W/cm3)	Magneettien vuontiteho (T)	Hankaushäviöt (W)	Rautahäviö (W)	Staattorihäviöt (W)	Roottorihäviöt (W)	Yhteensä (W)
933	950	200	8,82	0,195/0,821	4393	14653	3248	4239	26532
817	950	175	7,14	0,173/0,820	3063	11634	4035	4029	22761
700	950	150	5,75	0,136/0,823	2020	9184	5218	3704	20135
583	950	125	4,18	0,044/0,808	1235	6894	7351	3286	18767
466	950	100	2,67	-0,005/0,807	676	4847	11478	2423	19424
350	950	75	1,76	-0,109/0,812	311	3423	23285	2622	29642
233	950	50	1,64	-0,217/0,654	104	614	101238	7003	108960
933	900	200	8,92	0,196/0,826	4393	14590	2949	4198	26130
817	900	175	7,23	0,183/0,821	3063	11628	3619	4109	22420
700	900	150	5,89	0,150/0,824	2020	9120	4790	4026	19956
583	900	125	4,12	0,099/0,82	1235	6835	6605	3157	17832
466	900	100	2,72	0,006/0,808	676	4751	10212	2388	18057
350	900	75	1,76	-0,064/0,794	311	3340	20054	2633	26339
233	900	50	1,64	-0,217/0,654	104	614	101234	7003	108955
933	850	200	9,08	0,206/0,827	4392	14570	2688	4362	26013
817	850	175	7,18	0,192/0,821	3063	11512	3234	3829	21638
700	850	150	5,67	0,161/0,825	2020	8932	4256	3888	19097
583	850	125	4,25	0,117/0,822	1235	6763	5897	3239	17135
466	850	100	2,72	0,022/0,809	676	4713	9087	2379	16855
350	850	75	1,77	-0,039/0,797	311	3284	17519	2613	23727
233	850	50	1,61	-0,168/0,684	104	688	51336	6969	59098
933	750	200	9,27	0,230/0,819	4393	14476	2210	4415	25494
817	750	175	7,35	0,206/0,827	3063	11481	2580	3872	20996
700	750	150	5,76	0,188/0,821	2020	8845	3311	3660	17836
583	750	125	4,42	0,150/0,824	1235	6646	4671	3456	16009
466	750	100	2,81	0,050/0,809	676	4604	7060	2470	14811
350	750	75	1,66	0,009/0,816	311	3105	12941	1788	18146
233	750	50	1,76	-0,186/0,767	104	2138	43807	3733	49783
933	650	200	9,41	0,250/0,818	4393	14318	1819	4413	24945
817	650	175	7,55	0,232/0,819	3063	11433	2031	3996	20524
700	650	150	5,76	0,204/0,827	2020	8763	2533	3449	16765
583	650	125	3,92	0,228/0,837	1235	6483	4089	3168	14976
466	650	100	2,81	0,131/0,823	676	4504	5309	2401	12891
350	650	75	1,76	0,019/0,811	311	2976	9394	1925	14606
233	650	50	1,03	-0,107/0,805	104	1865	25746	1974	29690
933	550	200	9,47	0,271/0,816	4393	14189	1495	4442	24521
817	550	175	7,75	0,256/0,818	3063	11304	1601	4156	20125
700	550	150	5,99	0,235/0,819	2020	8712	1864	3587	16184
583	550	125	4,45	0,214/0,829	1235	6425	2526	3403	13590
466	550	100	2,96	0,216/0,836	676	4418	3785	2561	11440
350	550	75	1,89	0,061/0,811	311	2876	6673	2191	12052
233	550	50	0,991	-0,037/0,805	104	1715	16600	1867	20287
933	450	200	9,64	0,292/0,814	4393	14075	1228	4526	24223
817	450	175	7,78	0,280/0,816	3063	11186	1248	4059	19557
700	450	150	6,14	0,263/0,817	2020	8606	1381	3716	15724
583	450	125	4,51	0,239/0,819	1235	6357	1698	3112	12403
466	450	100	3,37	0,211/0,829	676	4440	2549	2982	10649
350	450	75	1,93	0,152/0,825	311	2806	4463	2145	9726
233	450	50	0,92	0,014/0,812	104	1613	10388	1366	13472
933	350	200	9,76	0,311/0,812	4393	13935	1002	4598	23929
817	350	175	7,91	0,303/0,814	3063	11072	968	4144	19248
700	350	150	6,18	0,291/0,815	2020	8505	1004	3687	15217
583	350	125	4,66	0,273/0,817	1235	6260	1155	3278	11929
466	350	100	3,22	0,244/0,819	676	4369	1544	2664	9255
350	350	75	2,01	0,246/0,839	311	2753	2635	2239	7939
233	350	50	0,97	0,059/0,751	104	1558	7076	1446	10184
933	250	200	9,9	0,327/0,810	4393	13841	832	4695	23759
817	250	175	7,98	0,323/0,811	3063	10981	746	7167	18958
700	250	150	6,27	0,315/0,812	2020	8413	710	3721	14865
583	250	125	4,71	0,304/0,814	1235	6189	746	3251	11421
466	250	100	3,36	0,286/0,816	676	4295	907	2842	8720
350	250	75	2,28	0,302/0,838	311	2776	1391	2491	6970
233	250	50	1,15	0,165/0,817	104	1496	3111	1804	6516
Testi 1									
700	950	150	5,75	0,136/0,823	2029	9184	5218	3704	20135
700	850	150	5,67	0,161/0,825	2029	8932	4256	3888	19097
700	810	150	5	0,162/0,759	2029	8872	4493	3343	18729
Test1 2									
700	824	150							
700	425	150	35186	0,287/0,76	2020	8610	1631	4040	16302
Leimaus									
500D	500	200	7,59	0,27/0,742	4392	11911	1338	3943	21585
660Y	500	150	4,7	0,237/0,755	2020	7610	1741	2995	14366



